

Saarekekonvertterin käyttö mikrotuotannossa

Sähkövoimatekniikan laboratoriohanke

Aila Petäjäjärvi

Opinnäytetyö
Teollisuuden ja luonnonvaran ala
Sähkötekniikka
Insinööri (AMK)

2015

Teollisuuden ja luonnonvaran ala
Sähkötekniikka

Tekijä	Aila Petäjäjärvi	Vuosi	2015
Ohjaaja	Marko Kukkola, ins. (AMK)		
Toimeksiantaja	Lapin ammattikorkeakoulu		
Työn nimi	Saarekekonvertterin käyttö mikrotuotannossa		
Sivu- ja liitemäärä	74 + 9		

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda teoreettista pohjaa sähkön tuotannon nykytilanteesta ja sähkön toimitusvarmuudesta sekä ottaa opetuskäyttöön saarekekonvertterin oppimisympäristö ja ohjeistaa laitteiston turvallinen käyttö opetus-, tutkimus- ja kehitystoiminnassa. Opinnäytetyö tehtiin Lapin ammattikorkeakoululle.

Tutkimuksellisessa osassa selvitettiin sähköntuotannon ja -jakelun nykytilaa, sähköverkon toiminnan ylläpidon haasteita ja sähköverkon toimintaa yhteiskäytössä ja saarekekäytössä. Kasvihuonepäästöjen rajoittaminen ohjaa tuottamaan sähköä uusiutuvilla luonnonvaroilla. Toimitusvarmuutta häiriötilanteissa voidaan kehittää alueellisten pientuotantolaitosten avulla muodostetuilla saarekeverkoilla. Työssä on tarkasteltu hajautettua mikrotuotantoa ja erilaisia mikrotuotantotapoja ja näiden verkkovaikutuksia. Häiriötilanteiden kannalta mikrotuotannon turvallinen toiminta, sähkön laatu ja verkon tehotasapainon ylläpito ovat tärkeimpiä verkon toimintavarmuutta ylläpitäviä seikkoja.

Työn soveltavassa osuudessa testattiin ja tutkittiin saarekekonvertterin käyttöä sähkövoimatekniikan laboratorion oppimisympäristössä. Hajautetun mikrotuotantoverkon energia tuotettiin tuulivoimageneraattorilla ja verkkoa ajettiin tehonhallintalaitteiston avulla sekä jakeluverkkoon liitettynä että saarekkeena. Saarekekäytön verkkovaikutuksia tutkittiin nopeiden kuormitusolosuhteiden muutoksilla. Työssä laadittiin saarekekonvertterin käyttöohjeistus ja oppimistehtäviä opetukseen ja käytännön harjoitteluun.

Opinnäytetyö mahdollistaa hajautetun mikrotuotannon ja saarekekäytön oppimisympäristön turvallisen ja ohjeistetun käytön tutkimus- ja kehitystoiminnassa sekä opetuskäytössä. Opinnäytetyön luomalla pohjalla voidaan ympäristöä hyödyntää verkon vikatilanteiden demonstroimiseen ja hallintaan.

Industry and Natural Resources
Electrical engineering

Author	Aila Petäjälä	Year	2015
Supervisor	Marko Kukkola, B. Sc. Eng (Tech)		
Commissioned by	Lapland University of Applied Sciences		
Subject of thesis	Island mode converter operation of the micro generation		
Number of pages	74 + 9		

The objective of the thesis was to provide theoretical basis from the present situation of the electricity production and the reliability of the distribution. Furthermore, the objective was to bring into teaching use the learning environment of the island mode converter and to give instructions on the safe use of the equipment in teaching, research and development. This thesis was done for Lapland University of Applied Sciences.

In the study part the present situation of electricity production and distribution, the challenges of the maintenance of the operation of the mains supply and the operation of the mains supply in the integrated use and in the island mode converter uses were cleared. The restricting of greenhouse emissions directs to produce electricity with renewable natural resources. The island mode converter networks formed by regional production plants can be used to improve reliability of delivery in fault situations. The decentralized micro grids and network effects of the micro generation have been examined in the thesis. The safe operation of the micro production, the quality of the electricity and the power balance of the network will be the most important points which maintain the reliability of the distribution in fault situations.

In the applied section the use of the island converter was tested and examined in learning environments of the laboratory of electrical power engineering. Distributed micro generation network energy was produced by wind power and the network was run by the power management system as well connected to the distribution network as the enclave. The network effects of the island mode converter use were studied with changes in high-speed load conditions. In the practical part of thesis instructions and assignments of the island converter for teaching and practical training was created.

The thesis enables, in the research and teaching the use of the safe and standard instruction for the micro grid and island mode converter learning in R&D as well as in learning / teaching use. The learning environment can be utilized to demonstrate network faults and extend the supply of the teaching in this way.

Keywords island mode operation, micro production, generation of electricity

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
1.1	Teknologiaa ajavia voimia.....	8
1.2	Sähkölaboratorion investointihanke	9
1.3	Sähköntuotanto, siirto ja jakelu sekä käyttö	9
1.4	Aiheen ajankohtaisuus.....	10
2	SUOMEN SÄHKÖNSIIRTOVERKKO JA SUURHÄIRIÖT	12
2.1	Sähköntuotanto ja kulutus.....	13
2.2	Sähkönsiirtoverkon rakenne	15
2.3	Sähkömarkkinalaki.....	18
2.4	Suurhäiriöt ja niihin varautuminen.....	20
2.5	Suurhäiriöiden riskin minimointi	22
2.6	Sähköverkon toimintavarmuuden tulevaisuuden haasteita	23
3	SÄHKÖVERKON TOIMINTA.....	25
3.1	Verkon käyttötavat	25
3.2	Hajautettu tuotanto	26
3.3	Taajuuden vaikutus.....	28
3.4	Jännitteen vaikutus	29
3.5	Tehotasapaino	29
4	MIKROTUOTANTO	31
4.1	Aurinkovoimalat	31
4.2	Tuulivoimala.....	34
4.3	Pienet vesivoimalat.....	37
4.4	CHP-laitokset.....	38
4.5	Polttokennot.....	39
4.6	Mikrotuotantoverkon saarekekäytön ylläpito	39
4.6.1	Taajuuden säätö.....	40
4.6.2	Jännitteen säätö	41
4.6.3	Tehonheilahtelut ja yliaallot	41
4.7	Energian varastointi	42
5	OPETUSYMPÄRISTÖ JA MITTALAITTEET	43
5.1	Sähkön tuotannon, siirron ja jakelun laitteistot.....	43
5.2	Sähkötyöturvallisuus	46

5.3	Mittauslaitteet.....	47
5.3.1	Yleismittarit.....	48
5.3.2	Sähkönlaatuanalysointilaitteet.....	50
6	SAAREKEKONVERTTERI	54
6.1	Rakenne	54
6.2	Toimintaperiaate	55
6.3	Saarekekonvertterin käyttö	56
6.4	Akusto.....	57
6.5	Taajuusmuuttajat	57
6.6	Laitteiston muut ohjaustoiminnot	58
6.7	Tuulivoimasimulaattori	60
7	SAAREKEKÄYTTÖ	61
7.1	Käyttötavat oppimisympäristössä	62
7.2	Saarekekonvertterin käyttöohjeistus	62
7.3	Oppimisympäristön hajautettu tuotanto.....	62
7.4	Tehotasapaino saarekekäytössä	63
7.5	Testauksen ja tutkimuksen suoritus.....	64
8	TULOSTEN KÄSITTELY	66
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	67
	LÄHTEET.....	69
	LIITTEET	74

ALKUSANAT

Kiitän Lapin Ammattikorkeakoulua mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta opinnäytetyön aiheesta ja mahdollisuudesta oppia käyttämään uusinta tekniikkaa olevia laitteistoja. Kiitän sähkölaboratoriahankkeen ohjausryhmätyöskentelyyn osallistuneita yritys yhteistyökumppaneita hyvästä yhteistyöstä ja neuvoista onnistuneeseen oppimisympäristöjen suunnitteluun ja toteuttamiseen. Erityiset kiitokset osoitan Kemijoki Oy:n Heikki Kusminille, Rovaniemen Verkko Oy:n Arvo Torkkolalle, ABB:n Matti Mannoselle ja Nocart Oy:n Pasi Mäkimartille. Saarekekonvertterin käyttövalmius oppimisympäristöissä mahdollistui pitkälti heidän ansioistaan. Kiitän ohjaajani Marko Kukkolaa opinnäytetyön ohjaamisesta ja Jouko Alanivaa mielenkiintoisista keskusteluhetkistä. Perhettäni ja erityisesti Marttia kiitän tuesta, kannustuksesta ja kärsivällisyydestä koko opinnäytetyöprosessin aikana.

Kemi 06.12.2015

Aila Petäjäjärvi

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

ABB	Asea Brown Boveri Ltd. Vuonna 1988 perustettu ruotsalais-sveitsiläinen teollisuuskonserni
AC	Altenating current, vaihtovirta
black start	pimeäkäynnistys, sähkönjakeluverkon ylösajo nollatilanteesta normaaliin tilanteeseen
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CHP-laitos	Combined Heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos
DC	Direct current, tasavirta
ELY-keskus	Elinkeino- liikenne- ja ympäristökeskus
EPS	Electricity power supply, sähkönsyöttöjärjestelmä
MicroScada	MICRO Supervisory control and data acquisition (SCADA), tietokoneen avulla käytettävä teollisuuden ohjaus- säätö-, valvonta- ja tiedonkeruujärjestelmä
PGU	Power Generator Unit, voimageneraattoriyksikkö
PMU	Power Management Unit, sähkönhallintayksikkö
R&D	Research and Development, tutkimus ja kehitys
Smart Grid	Älykäs verkko
TRMS	True root means square, todellinen tehollisarvo
Wp	Watt peak, aurinkopanelin teho
VALVE	VALVE – 2014 häiriöharjoitus / Valot Verkkoon 2014
VVER	Voda Voda Energo Reaktor, länsimaista kiehtusvesireaktorityyppiä vastaava venäläinen reaktorityyppi
VRLA	Valve-Regulated Lead Acid battery, venttiiliohjattu lyijy-akurakenne
UPS	Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön sähkönsyöttö

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö on tehty Lapin ammattikorkeakoululle Teollisuuden ja luonnonvaran osaamisalalle sähkövoimatekniikan laboratorioon. Lapin ammattikorkeakoulu aloitti toimintansa vuoden 2014 alussa Kemi-Tornion ja Rovaniemen ammattikorkeakoulujen yhdistyttyä. Nykyisin Lapin ammattikorkeakoulun toimintaa on Kemissä, Rovaniemen ja Tornion kampuksilla. Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus toimii Kemissä Kosmoksessa uusissa saneeratuissa tiloissa.

1.1 Teknologiaa ajavia voimia

Häiriötön sähkön saanti korostuu nykyisessä yhteiskunnassamme sääolosuhteiden tuomien haasteiden myötä. Yhteiskuntamme haavoittuvuus näkyy muun muassa myrskyjen aiheuttamien sähkökatkosten moninaisina seurauksina. Koko infrajärjestelmämme tarvitsee toimiakseen sähköä. Sähkön toimitusvarmuus korostuu yhä laajemmalle kuluttajajoukolle. Lainsäätäjä on ottanut sähkön toimitusvarmuuteen kantaa määrittelemällä sähkömarkkinaissa muun muassa korvausvelvollisuudet pitkäaikaisissa sähkökatkoissa.

Euroopan unioni on sitoutunut kasvihuonepäästöjen pienentämiseen, ja kansallisella tasolla Suomi on sitoutunut supistamaan kasvihuonepäästöjä 16 % vuoden 2005 tasosta vuoteen 2020 mennessä. Fossiilisten energialähteiden rinnalle etsitään uusiutuvien luonnonvarojen saasteettomia energiantuotantoratkaisuja. Lisäksi kulutusta pyritään kehittämään energiatehokkaaksi ja pienempipäästöiseksi. Valtion tukipolitiikalla on rohkaistu käyttämään uusiutuvia energiatuotannon muotoja. (Jääskeläinen 2014.)

Ilmastonmuutos, päästörajoitukset ja energiatehokkuus ohjaavat voimakkaasti sähköntuotantoa ja käyttöä. Teknologia uudistuu nopeasti uusiutuvien luonnonvarojen käyttöönoton myötä. Nopeasti kehittyvä teknologia mahdollistaa täysin uudenlaisen ajattelutavan sähköntuotannossa, siirrossa ja jakelussa sekä sähkökäytöissä. Verkon hallinta ja sähkökäyttöjen optimointi tulee muuttamaan myös kuluttajien käyttötottumuksia. Uusiutuva teknologia vaatii oppilaitoksilta inves-

tointeja, jotta opetusta voidaan toteuttaa tehokkaasti ja käytännönläheisesti uusilla laitteilla ja tekniikoilla. Tämä nähtiin ammattikorkeakoulumme organisaatiossa potentiaalisena haasteena, jonka organisaatio otti vastaan käynnistämällä sähkölaboratoriahankkeen valmistelun.

1.2 Sähkölaboratorion investointihanke

Lapin ammattikorkeakoulun sähkötekniikan laboratoriot uudistettiin Sähkölaboratoriahankkeessa vuosina 2011 – 2014. Hankkeet toteutettiin EAKR- ja ESR-hankkeina, joiden yhteisbudjetti oli 1,9 milj. €. Laboratorioihin investoitiin hankkeessa 1,36 milj. € uusinta teknologiaa olevaa sähkö- ja automaatiotekniikan opetuslaitteistoja. Opettajien ja henkilökunnan osaamista kehitettiin vajaalla 0,6 milj. €:lla. Hankkeen rahoittajina toimivat ELY-keskus, Lapin Liitto, Meri-Lapin kehittämiskeskus, Digipolis Oy ja Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, joka yhdistyi myöhemmin Lapin ammattikorkeakouluun.

Hankkeen ohjausryhmä muodostui alan toimijoista alueella. Ohjausryhmän organisaatioiden asiantuntijatiimit osallistuivat aktiivisesti opetushenkilöstön mukana koko hankkeen ajan suunnittelu-, kehitys-, toteutus- ja käyttöönotto-työhön. Hankkeessa suunniteltiin, hankittiin ja käyttöönotettiin sähköntuotannon, siirron ja jakelun, sähkökäyttöjen ja kiinteistösähköistyksen laboratorioden oppimisympäristöjen lisäksi koneautomaation, automaation, ohjaustekniikan ja CAD-suunnittelulaboratorioden oppimisympäristöt.

1.3 Sähköntuotanto, siirto ja jakelu sekä käyttö

Sähkövoimatekniikan laboratorioon suunniteltiin ja hankittiin kattava sähkövoimatekniikan oppimisympäristö. Sähköä tuotetaan 32 kVA:n dieselgeneraattorin lisäksi 3,2 kW:n aurinkopaneeleilla. Tuulivoimageneraattoreita ei voitu suunnitella ympäristöön kiinteistön sijainnin vuoksi, koska lentokoneiden nousu- ja laskulentoradat kulkevat kiinteistön välittömässä tuntumassa. Tästä syystä testaushuoneeseen rakennettiin tuulivoiman käyttöympäristöksi tuulivoimasimulaattori.

Sähkön jakelu- ja siirtoverkon muodostavat 110 kV:n kytkinkenttäkojeisto sekä 10 kV:n keskijännitekojeisto. Keskijännitekojeistoon on kytketty generaattorilähdön lisäksi moottori-, muuntaja- ja johtolähdöt. Laitteistot ovat aitoja 110 kV:n ja 10 kV:n kojeistoja, mutta sähköturvallisuuden vuoksi ne toimivat 400 V:n jännitteellä. Johtolähtö syöttää ulos asennettua ilmalinjaa ja jännite nostetaan muuntajalla aidoksi 20 kV:n jännitetasoksi ilmalinjassa. Ulkona olevia erotinasemia ohjataan etänä satelliittiyhteyden avulla. Sähkölaitoksen ohjaustekniikkaa ja automaatiota ohjataan paikallisohjausten lisäksi ABB:n MicroScada-järjestelmällä.

Sähkövoimalaboratorion sähkönjakelujärjestelmään on liitetty saarekekonvertteri, joka mahdollistaa saarekekäytön tutkimista ja opiskelua. Saarekekonvertterissa on akusto, ja tuulivoimageneraattorilla voidaan tuottaa sähköä saarekekäyttöön. Kuormitukseksi voidaan kytkeä esimerkiksi moottoreita, lämmittimiä tai valaistusta. Sähkönjakeluun vaikuttavat uudet kehittyvät tekniikat kuten sähköautot. Latauskapasiteetin kasvuun on varauduttava sähköverkon suunnittelussa ja lisäksi on huomioitava sähköautojen latauksen verkkovaikutukset. Sähköauton latausaseman oppimisympäristö mahdollistaa lataus- ja purkaustoimenpiteiden verkkovaikutuksen tutkimuksen.

Laitteistotoimitukset tulivat ABB:n eri toimintayksiköiden yhteistyönä, ja ABB vastasi laitteistojen suunnittelu- ja asennustöistä. Projekti oli myös ABB:n näkökulmasta poikkeava ja mittava, sillä ABB:n toimittamat laitteistot modifioitiin laboratorioympäristöön 400 V jännitteellä toimiviksi demolaitteistoiksi.

1.4 Aiheen ajankohtaisuus

Hajautetun tuotannon ja mikrotuotannon yleistyessä sekä kulutuksen muuttuessa tulee verkon hallinta yhä tärkeämmäksi. Varautuminen erilaisiin häiriötilanteisiin on ajankohtainen ja laajasti mielenkiintoa herättävä aihepiiri. Saarekekonvertterin hankinta opetuskäyttöön laboratoriahankkeessa tuli VALVE- (Valoa Verkkoon 2014) suurhäiriötilanneharjoituksen osallistujaorganisaation edustajalta. Saarekekonvertterin oppimisympäristössä on tavoitteena oppia saarekekäyttöjen perusteita ja saarekkeiden etäohjausta, tarkastella ja tutkia tuulivoimatuotannon

verkkovaikutuksia sekä automatiikan toimintaa häiriötilanteen aikana ja normaalin verkkosähkön palautumisen jälkeen. Lisäksi työntilaajan toimesta haluttiin laitteisto ottaa normaaliin opetuskäyttöön ja samalla haluttiin saada erilaisia laboratorioharjoituksia ja tilannesimulaatioita opetus- ja tutkimuskäyttöön.

Opinnäytetyössä käsitellään ensin Suomen sähköjakeluverkon rakennetta ja suurhäiriöitä. Seuraavaksi tarkastellaan verkon toimintaa ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Neljännessä luvussa käsitellään mikrotuotantoa, mikrotuotantoteknologioita ja hajautetun mikrotuotantoverkon toiminnan ylläpitoon liittyviä haasteita. Sähkövoimatekniikan laboratorion sähköntuotantoa, siirtoa ja jakelua sekä käyttöympäristöjä ja laitteita käsitellään kokonaiskuvan muodostamiseksi. Saarekekonvertterin rakenne ja käyttö käsitellään työn luvuissa 6 ja 7. Näiden tuloksena saadaan saarekekonvertterin turvallinen käyttö opetuksessa määriteltyä ja luodaan laitteiston käytölle ohjeistus. Lisäksi saadaan kokemusta saarekekäytöistä, tehotasapainon hallinnasta ja tuulisimulaattorilla tuotetun ja verkkoon siirretyn sähköön laadusta. Johtopäätökset luvussa nousee esille mielenkiintoisia jatkokehitys- ja tutkimuskohteita.

2 SUOMEN SÄHKÖNSIIRTOVERKKO JA SUURHÄIRIÖT

Suomen sähkönsiirtojärjestelmän runkona toimii kantaverkko. Sähkönsiirtoverkosto koostuu suurjänniteverkosta, jonka jänniteportaat ovat 400 kV:a, 220 kV:a ja 110 kV:a. Jakeluverkosto koostuu keskijännitteisistä jakeluverkoista sekä kuluttajille toimitettavan sähkön pienjännitteisistä jakeluverkoista. Kantaverkkoon on liitetty suuret voimalaitokset ja suuria teollisuuslaitoksia ja tehtaita sekä alueelliset jakeluverkot. Fingrid Oyj omistaa, ylläpitää ja kehittää Suomen kantaverkkoa. Fingrid Oyj vastaa myös sähkönsiirron ulkomaanyhteyksistä. (Fingrid Oyj 2015.)

Sähköntuotannon energialähteinä ovat fossiilisten lähteiden lisäksi lisääntyvissä määrin bioenergiälähteet. Tuontisähkön osuus on noin viidennes koko sähköntuotannosta. Päästökauppa vaikuttaa sähköntuotantoon rajoittamalla fossiilisten energiatuotantomuotojen käyttöä ja suosien uusiutuvien energialähteiden tuotantomuotoja. Kioton sopimuksen ja Euroopan unionin sisäisen päästökauppajärjestelmän päästökaupan tavoitteena on kasvihuonepäästöjen seuraaminen ja hiili-dioksidin päästövähennystavoitteiden saavuttaminen kustannustehokkaasti. (Energiavirasto 2015.)

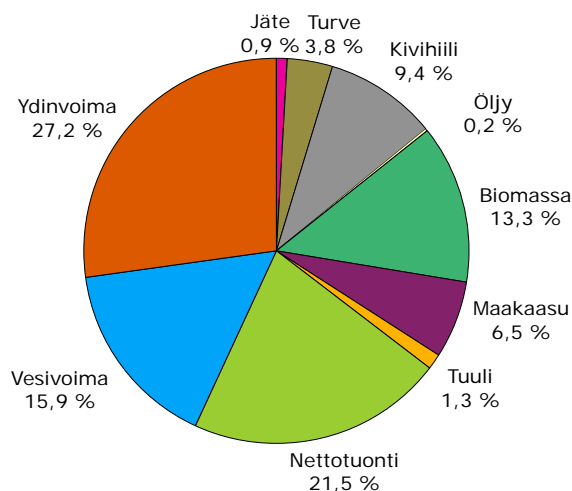
Sähköverkon suurhäiriöllä tarkoitetaan tilannetta, jossa sähkönsiirto keskeytyy laajalta alueelta kriisitilanteessa. Ilmastollisten tekijöiden kuten ukkosen, tykkylumen, jäätävän sateen, tulvan ja myrskyn lisäksi sähköverkon kriisitilanteeseen voidaan joutua ilkvallan, terrorismin, vieraan vallan aseellisen toiminnan, verkon ylikuormittumisen tai inhimillisen tekijän vuoksi. (Laitinen 2015, 8-10)

Suurhäiriötilanteita varten Fingrid on laatinut ohjeistuksen toimintasuunnitelmaksi. Suurhäiriötilanteisiin varaudutaan käymällä mahdollisia tilanteita läpi erilaisin harjoituksin. (Fingrid Oyj 2015.)

2.1 Sähköntuotanto ja kulutus

Sähköä tuotetaan vesivoimalaitoksissa, lämpövoimalaitoksissa, ydinvoimalaitoksissa, kaasuturbiinivoimaloissa ja tuuli- ja aurinkovoimaloissa. Suomessa on noin 400 voimalaitosta, joista puolet on vesivoimalaitoksia. Lämpövoimalaitoksista pelkästään sähköä tuottavaa laitosta kutsutaan lauhdevoimalaitokseksi ja sekä lämpöä että sähköä tuottavaa laitosta kutsutaan yhteiskäyttölaitokseksi. Ydinvoimalaitokset voivat olla kiehumusvesireaktori- tai painevesireaktori-tyyppisiä laitoksia. Suomessa Teollisuuden Voima Oyj:n Olkiluodon ydinvoimalaitoksien OL1- ja OL2- reaktorit ovat tyypiltään kiehumusvesireaktoreita ja OL3 on painevesireaktori. Fortum Oyj:n ydinvoimalaitosten reaktorit Loviisa 1 ja Loviisa 2 ovat tyypiltään painevesireaktoreita. Fennovoima Oy:n Hanhikivelle suunnittelema ydinvoimalaitoksen reaktori tulee olemaan venäläinen (VVER) kiehumusvesireaktori-tyyppi.

Sähkön tuotannon energialähteistä merkittävimmät ovat uraani, vesi, kivihiili, puuperäiset polttoaineet, maakaasu ja turve. Tuuli- ja aurinkoenergian merkitys sähkön tuotannossa kasvaa teknologian kehittymisen myötä. Kaaviossa 1 on esitetty sähkön hankinta energialähteittäin vuonna 2014. Kokonaissähkön kulutus oli 83,3 TWh vuonna 2014. Tuontisähkön osuus on huomattavan iso, 21,5 %. (Energiateollisuus ry 2015.)



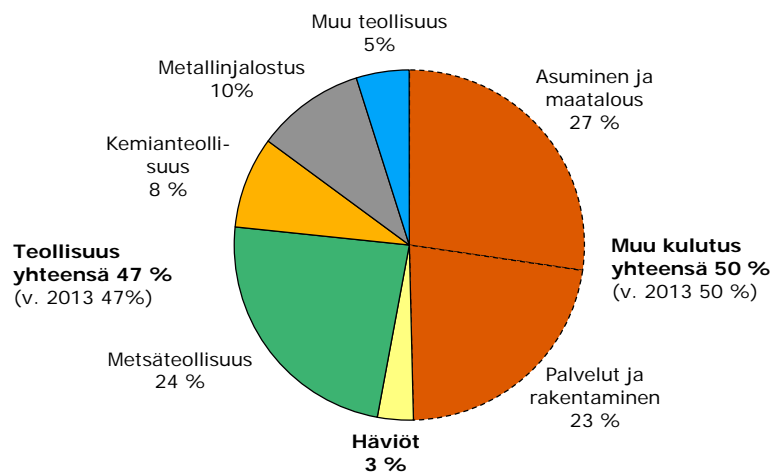
Kaavio 1. Suomen sähkön hankinta energialähteittäin vuonna 2014. (Energiateollisuus ry 2015a)

Sähköä tuotetaan verkkoon kulutuksen mukaan. Sähköntuotanto muodostuu perustuotannosta ja vaihtelevasta kysynnän mukaisesta tuotannosta. Perustuotannossa voimalaitokset käyvät yleensä koko ajan täydellä teholla. Tyypillisiä peruskuormaa tuottavia voimalaitoksia ovat ydinvoimalaitokset ja lauhdevoimalaitokset. Vesivoimalaitoksia käytetään nopeasti saatavilla olevana säätövoimana, jolla verkon sähkön kulutuksen vaihteluita tasataan joustavasti. Nopeasti verkkoon käynnistettäviä kaasuturbiinilaitoksia käytetään varavoimareservinä. Tuulivoimalat tuottavat hyvissä tuuliolosuhteissa sähköä valtakunnan verkkoon, mutta tuulettomassa tilanteessa tuulivoimaloiden sähkön tuotanto on korvattava säätövoimalla. Aurinkovoimaloiden suurin sähköntuotto Suomessa ajoittuu maaliskuulta lokakuulle. (Fingrid Oyj 2015; Energiateollisuus ry 2015.)

Pakkaspäivien ja suurimpien kulutushuippujen osuttua talvikuukausille on sähköntuotannon resurssit mitoitettava maksimikulutuksen mukaan. Toinen vaihtoehto on rajoittaa kulutusta kulutushuippupäivinä ja turvata tärkeimmät toiminnot. Suomen sähköntuotannon vajetta huippukulutuspäivinä kompensoidaan rajoitusten lisäksi tuontisähköllä. Kulutushuiput osuvat pakkaspäiville ja maantieteellisistä seikoista johtuen myös naapurimaissa kulutushuiput osuvat laajojen kylmien ilmassojen vuoksi kyseisille päiville. Tämä nostaa sähkön hintaa kohtuuttomasti. (Fingrid Oyj 2015.)

Sähkön varastointi tasaa kulutushuippuja, mutta sähköenergia on saatava nopeasti käyttöön tehontarpeen mukaan. Sähköenergiavarastoina Suomessa toimivat vesivoimaloiden vesialtaat ja myös turve-, bio- ja puumassavarastoja voidaan pitää merkittävinä sähköenergian varastoina. Sähköenergian varastointi sähköiseen muotoon verkossa on haasteellista nykyisellä akkuteknologialla. Helen ja Helen Sähköverkko rakentavat yhteistyössä Fingridin kanssa Suvilahteen litiumioni-akkukennoista 1,2 MW:n sähkövarastoa pilottihankkeena. Sähkövarasto otetaan käyttöön keväällä 2016 ja sen energiakapasiteetti tulee olemaan 600 kWh. Helen tulee käyttämään sähkövarastoa Suvilahden ja Kivikon aurinkovoimaloiden energiavarastona. Onnistuneet kokemukset suurista akkuvarastoista saattavat mullistaa sähkön varastoinnin ja luoda uusia liiketoimintamalleja sähkömarkkinoille tulevaisuudessa. (Energiateollisuus ry 2015; Helen 2015.)

Energiaviraston mukaan sähkönkulutus pieneni vuonna 2014 edellisestä vuodesta 0,5 TWh. Kulutuksen pieneneminen johtui Energiaviraston mukaan talouden taantumasta ja normaalia lämpimämmästä säästä vuoden aikana. Teollisuuden osuus sähkön kulutuksesta oli 47 % ja muun kulutuksen osuus 53 %. Kaaviosta 2 ilmenee teollisuuden kulutuksen jakaantuminen eri teollisuuden alojen mukaan sekä muun kulutuksen jakaantuminen yksityiseen ja julkiseen kulutukseen. (Energiateollisuus ry 2015.)



Kaavio 2. Sähkön kokonaiskäyttö vuonna 2014 (Energiateollisuus ry 2015)

Suomi ei ole omavarainen sähkön tuotannon suhteen vaan tarvitsee huomattavasti tuontisähköä. Suomesta on verkkoyhteydet Ruotsiin, Norjaan, Venäjälle ja Viroon. Vuonna 2014 tuotiin sähköä eniten Ruotsista, Venäjältä sähköntuonti on pienentynyt edellisvuosiin verrattuna. Viroon vietiin sähköä Suomesta. Fingrid Oyj:n nettisivuilta voi seurata voimansiirtojärjestelmän tilannetta reaaliajassa. (Energiateollisuus ry 2015; Fingrid Oyj 2015.)

2.2 Sähkönsiirtoverkon rakenne

Suomen sähköverkkoon kuuluvat kantaverkko, alueverkot ja jakeluverkot. Fingridin hallitsemaan Suomen kantaverkkoon kuuluu 400 kV:n, 220 kV:n ja 110 kV:n voimansiirtolinjojen lisäksi muuntamoita, sähköasemia ja voimalaitoksia. Yhtiö

vastaa kantaverkon valvonnasta, käytön suunnittelusta, verkon ylläpidosta, rakentamisesta ja kehittämisestä, häiriöttömästä sähkön siirrosta ja sähkömarkkinoiden toiminnan edistämisestä. (Fingrid Oyj 2015.)

Kantaverkko on sähkön tuottajien ja sähkön kuluttajien käytön mahdollistama siirtoverkko. Sähkökauppaa voidaan käydä siirtoverkon avulla koko valtakunnan alueella ja siirtoyhteysien avulla ulkomailla. Suurin osa Suomessa kulutetusta sähköstä siirretään kantaverkon kautta. Kuvassa 1 on Suomen sähkösiirtoverkon rakenne. Kuvasta näkyy maantieteellisten yhteyksien sijainnit Norjaan, Ruotsiin, Venäjälle ja Viroon. Ylikkälästä Venäjälle ja Raumalta Ruotsiin ovat tasavirtayhteydet. Viron siirtoyhteys toimii tasavirtayhteytenä. (Fingrid Oyj 2015.)

Kantaverkon pitkät siirtoetäisyydet muodostavat haasteen sähköverkon valvontaan ja häiriöttömän sähkön siirron varmistamiseen poikkeustilanteissa. Voimansiirron varmistaminen poikkeustilanteissa on varmistettu kantaverkon rengasrakenteella. Sähkövian sattuessa siirtolinjalle voidaan sähkönsyöttö toteuttaa renkaan kautta toisesta suunnasta kuluttajalle. Verkon rengasmainen rakenne näkyy kuvasta 1 havainnollisesti. Esimerkiksi Lieksa on sähkönsyötön kannalta renkaassa. Vian sattuessa syötön toisessa haarassa on mahdollista erottaa vika- paikka ja syöttää sähköä silmukan toisen haaran kautta.

FINGRID OYJ:N VOIMANSIIRTOVERKKO

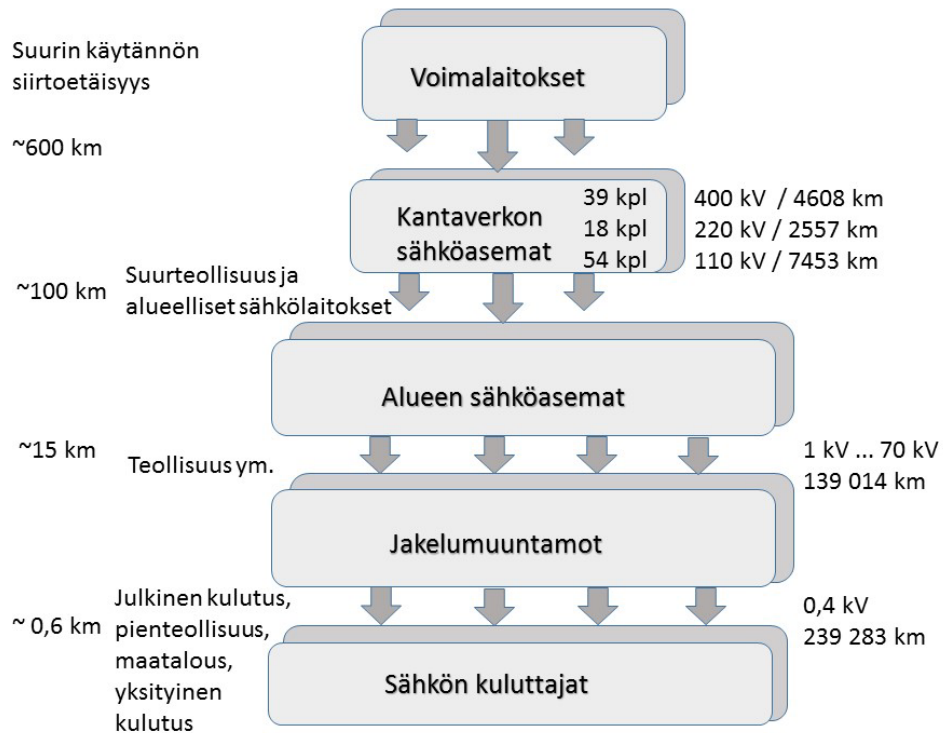
1.1.2015

- 400 kV kantaverkko
- 220 kV kantaverkko
- 110 kV kantaverkko
- tasavirtayhteys
- muiden verkko



Kuva 1. Suomen kantaverkon rakenne ja yhteydet naapurimaihin. (Fingrid Oyj 2015)

Energiaviraston tietojen mukaan olivat verkkopituudet vuonna 2012 kaavion 3 mukaiset. Verkkoa uudistetaan, vahvistetaan ja rakennetaan voimakkaasti, joten luvut elävät hieman verkon muutostöiden myötä.



Kaavio 3. Sähkön siirtoverkko voimalaitoksilta kuluttajille.

Kaaviossa 3 esitetyjen jänniteportaiden, sähköasemien lukumäärän ja siirtoverkon pituuden avulla voidaan muodostaa käsitystä sähkönsiirtoverkon infrastruktuurin ylläpitoon ja käyttöön liittyvistä haasteista. Kaavion tiedot on päivitetty vuoden 2015 Energiateollisuuden antamia tietoja vastaaviksi. Suomen sähkön tuotanto on hajautettu maantieteellisesti laajalle alueelle, mikä on sähkönsiirtoverkon sähköteknisen hallinnan kannalta hyvä asia. (Elovaara & Laiho 2007, 33; Energiateollisuus ry 2015; Energiavirasto 2015.)

2.3 Sähkömarkkinalaki

Sähkömarkkinalaki (588/2013) määrittelee tarkoin sähkön sähköntuotantoa, tuontia ja vientiä, sekä sähkönsiirtoa ja -jakelua koskevat periaatteet, velvollisuudet ja toiminnan. Laki edellyttää verkkoyhtiöiltä toimitusvarmuutta ja sähkömark-

kinalaissa on asetettu toimitusvarmuustasot. Lain tavoitteena on varmistaa ja turvata hyvän sähkön toimintavarmuus, kilpailukykyinen sähkön hinta ja kohtuulliset palveluperiaatteet loppukäyttäjälle. Sähkömarkkinalain pykälä 19 määrittelee verkonhaltijan yleiset kehittämisvelvollisuudet.

”Verkonhaltijan tulee riittävän hyvälaatuisen sähkön saannin turvaamiseksi verkonsa käyttäjille ylläpitää, käyttää ja kehittää sähköverkkoaan sekä yhteyksiä toisiin verkkoihin sähköverkkojen toiminnalle säädettyjen vaatimusten ja verkon käyttäjien kohtuullisten tarpeiden mukaisesti.

Sähköverkko on suunniteltava ja rakennettava ja sitä on ylläpidettävä siten, että:

- 1) sähköverkko täyttää sähköverkon toiminnan laatuvaatimukset ja sähkönsiirron sekä -jakelun tekninen laatu on muutoinkin hyvä;*
- 2) sähköverkko ja sähköverkkopalvelut toimivat luotettavasti ja varmasti silloin, kun niihin kohdistuu normaaleja odotettavissa olevia ilmastollisia, mekaanisia ja muita ulkoisia häiriöitä;*
- 3) sähköverkko ja sähköverkkopalvelut toimivat mahdollisimman luotettavasti normaaliolojen häiriötilanteissa ja valmiuslaissa (1552/2011) tarkoitetuissa poikkeusoloissa;*
- 4) sähköverkko toimii yhteensopivasti sähköjärjestelmän kanssa ja se voidaan tarvittaessa liittää yhteen toisen sähköverkon kanssa;*
- 5) sähköverkkoon voidaan liittää vaatimukset täyttäviä käyttöpaikkoja ja voimalaitoksia;*
- 6) verkonhaltija kykenee muutoinkin täyttämään sille kuuluvat tai tämän lain nojalla asetetut velvollisuudet.*

Sähköverkkojen sähköturvallisuudesta säädetään erikseen.” (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 19§.)

Sähkömarkkinalain pykälässä 28 määritellään, että verkonhaltijan on varauduttava normaaliolojen häiriötilanteisiin ja valmiuslaissa tarkoitettuihin poikkeusoloihin. Verkon haltijan on laadittava varautumissuunnitelma ja osallistuttava huoltovarmuuden turvaamiseen tähtäävään valmiussuunnitteluun. Varautumissuunnitelma on päivitettävä vähintään kerran kahdessa vuodessa ja silloin, kun olosuhteissa tapahtuu merkittäviä muutoksia. (Sähkömarkkinalaki 588/2013, 28§.)

2.4 Suurhäiriöt ja niihin varautuminen

Sähköverkkojen häiriöt voidaan jakaa tapahtuma-alueen verkonosan perusteella kanta-, ja alue- sekä jakeluverkon häiriöihin. Jakoa voidaan tehdä myös häiriön syyn perusteella. Suurhäiriöiden tavallisimpia syitä ovat ilmastolliset tekijät kuten ukkonen, lumitykky, jäätävä sade, myrsky, tulva jne. Inhimillisiä tekijöitä ovat ihmisen tekemät virheet tai tekniset viat. Edellä esitettyjen perinteisten suurhäiriön aiheuttajien joukkoon on lisättävä ilkivalta, terrorismin uhka, vieraan vallan aseellinen toiminta ja tietoverkkoihin kohdistuvat kyberuhkat. Verkon hallinta, kulutuksen romahtaminen tai äkillinen kasvu voi johtaa tehotasapainon menetykseen ja saada dominoefektinä pienestä alueellisesta häiriöstä kehittyvän suurhäiriön. (Verho, Stranden, Nurmi, Mäkinen, Järventausta, Haqkvist, Partanen, Lassila, Kaipia & Honkapuro 2010, 6; Valli 2015, 29)

Suurhäiriöiden määrittelyn lähtökohtana on perinteisesti ollut sähköverkonhaltijan näkökulma. Näissä määrittelyissä suurhäiriön kriteereinä on ollut muun muassa sähkökatkon kesto aika ja vaikutusalueen laajuus. IEEE Std 1366-1998 määrittelee suurhäiriöt seuraavasti:

”Suurhäiriö (major event) on tapahtuma, jossa sähköjärjestelmän mitoitusrajaukset ylittyvät ja jolle pätee seuraavat kohdat:

- a) laajoja vaurioita sähköverkolle*
- b) ennalta määritelty prosentuaalinen osuus verkon asiakkaista on sähköttä*
- c) sähköön palautuminen kestää yli tietyn ajan*

Esimerkkejä ovat äärimmäiset sääolosuhteet ja maanjäristykset.”
(IEEE1998.)

Myöhemmin IEEE Std 1366-2003 määrittelee muun muassa suurhäiriön tapahtumaksi, joka ylittää kohtuulliset sähköjärjestelmän mitoitus- ja toimintarajat sekä kestonä suurhäiriön tulee kestää ainakin yhden suurhäiriöpäivän ajan. (IEEE 2003.)

Suomessa Verkostosuosituksia antava Sener (nykyisin Energiateollisuus) on määritellyt toimintaohjeessa ”Sähköverkkoyhtiön toiminta suurhäiriössä” seuraavan määrittelyn suurhäiriölle: *”Ohjetta sovelletaan laajoissa useita johtolähtöjä tai yli 20 % asukkaista koskevissa myrsky-, ukkos-, lumikuorma- yms. vastavissa häiriöissä.”* (Sener 2002)

Tampereen Teknillisen yliopiston Sähköenergiatekniikan laitos ja VTT:n Riskienhallintaan erikoistunut tutkimusryhmä on määrittelyt terminologiaa täsmällisemmäksi tutkimushankkeessa ”Sähkönhuollon suurhäiriöiden riskianalyysi- ja hallintamenetelmien kehittäminen” 2009 -2011. Raportissa todetaan, että täsmennyksenä Sähkönjakelun suurhäiriön sijasta tulee käyttää termejä Sähkönhuollon suurhäiriö, jolloin viitataan laajasti sekä kanta-, alue- että jakeluverkkojen häiriöihin eikä pelkästään jakeluverkon häiriöihin. Tutkijaryhmä esittää raportissaan seuraavan määritelmän:

”Sähkönhuollon suurhäiriö = pitkäkestoinen ja/tai laaja sähkökatko, jonka seurauksena pelastuslaitoksen ja yhden tai useamman muun julkisen toimijan (kunta, poliisi jne.) on tarve ryhtyä jakeluverkonhaltijan lisäksi toimenpiteisiin vähentääkseen häiriöstä aiheutuvia vakavia henkilö- ja omaisuusvahinkoja.” (Verho ym. 2010, 13)

Valmiuslain 29.12.2011/1552 tarkoituksena on poikkeusoloissa suojata väestöä sekä turvata sen toimeentulo ja maan talouselämä, ylläpitää oikeusjärjestystä, perusoikeuksia ja ihmisoikeuksia sekä turvata valtakunnan alueellinen koskemattomuus ja itsenäisyys. Yhteiskunnan riippuvuus sähkövoimantuotannosta ja sähkö- ja televerkkojen toimivuudesta kasvaa. Häiriötilanteiden varalta harjoitellaan toiminnan sujuvuutta eri viranomaistahojen koordinoimissa harjoituksissa. Harjoituksien avulla voidaan analysoida suurhäiriötilanteissa varautumissuunnitelman toimivuutta, toiminnan sujuvuutta ja tehokkuutta. Sähköyhtiöiden ja viranomaisten yhteistyössä järjestämässä VALVE 2014 -häiriöharjoituksessa (Valot verkkoon 2014) harjoiteltiin syyskuussa 2014 kansallista sähkönpalautusta suurhäiriötilanteessa. Harjoitus toi esiin monia kehitystarpeita muun muassa viran-

omaisten tiedonkulkuun, matkapuhelinverkkojen toimivuuteen lähinnä tukiasemien varavoiman kytkeytymiseen liittyen ja alueen kuntien valmiuteen suurhäiriötilanteessa. (Pahkin 2014; Fingrid Oyj 2015; Valli 2015, 29)

VALVE 2014 -häiriöharjoituksessa harjoiteltiin kuvitteellisen suurhäiriön aiheuttamaa valtakunnallista sähkökatkoa ja sähköjen palautusta Pohjois-Suomen vesivoiman avulla valtakunnan verkkoon. Harjoituksessa testattiin muun muassa yleistä kansallista suurhäiriövalmiutta, käynnistykseen tarvittavaa black start -valmiutta sekä voimalaitosten saarekekäyttövalmiuksia. Harjoituksen tuloksena sähköjen palautus onnistuu pohjoisen vesivoiman avulla valtakunnan verkkoon, vaikka asetettujen aikataulujen puitteissa harjoitus oli keskeytettävä. (Päivinen 2014.)

Saarekekäytöllä tarkoitetaan verkon tai verkonosan toimimista omana saarenaan ilman liityntää valtakunnan verkkoon. Suurhäiriön sattuessa valtakunnan laajuisena voidaan alueellisia tuotantolaitoksia käynnistää ja rajata toiminta alueellisiin saarekkeisiin. Haasteeksi alueiden liittämässä toisiinsa tulee tehotasapainon ylläpito.

2.5 Suurhäiriöiden riskin minimointi

Sähköverkkoyhtiöt kehittävät verkkojaan parantaakseen toimintavarmuutta ja lyhentääkseen häiriötilanteiden sähkökatkoja. Työtä tehdään sekä organisaatioiden valmiuksien kehittämiseksi että fyysisen verkon kehittämiseksi. Verkon kehitystyö näkyy tiheään asutuilla alueilla ilmajohtolinjojen siirtymisenä maakaapeloi-tuihin verkkoihin. Maaseudulla avojohtoja siirretään tienvarteen nopean viankorjauksen mahdollistamiseksi. Kantaverkon ilmalinjojen verkonraivaustyöt ja tykkylumen pudotus muun muassa helikopterilentojen avulla ovat yleistyneet ja vakioituneet verkon huoltotoimenpiteiksi. Verkostoautomaation uudistaminen, relesuojauksen nykyaikaistaminen ja etäohjaustekniikka mahdollistavat vika-alueen nopean erottamisen verkosta ja siten vian aiheuttaman häiriövaikutuksen rajaamisen mahdollisimman pieneksi. Organisaatiovalmiuksien kehittämisessä on avainasemassa häiriötilanteen aikainen korjaushenkilöstön kapasiteetti. Mitä

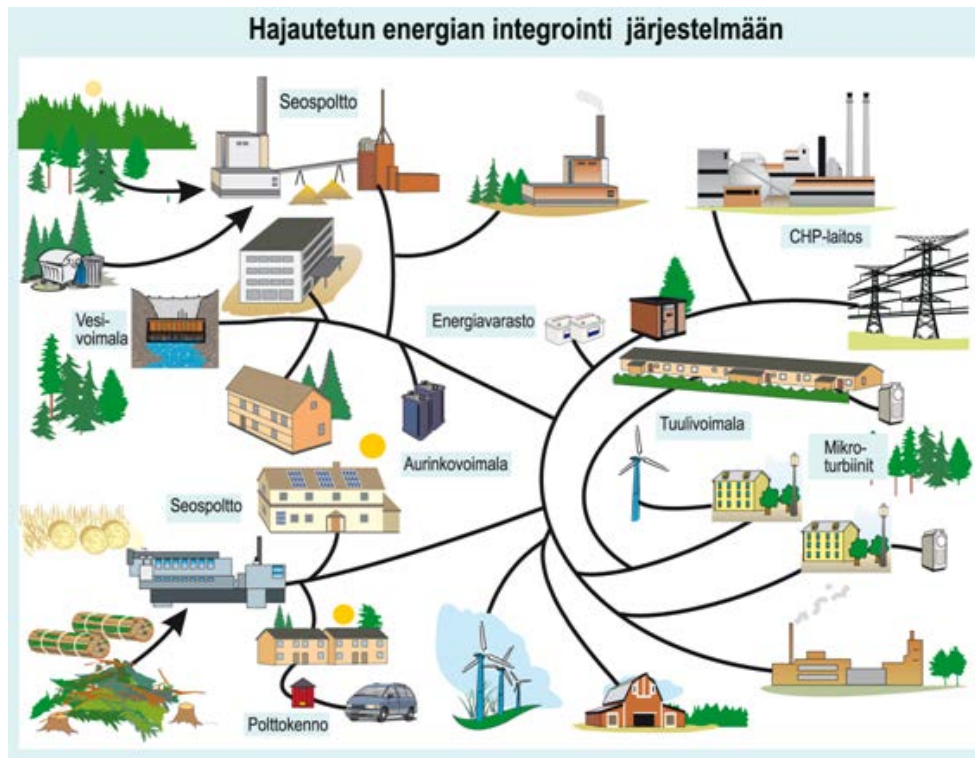
suurempi korjausreservi on käytössä, sitä nopeammin vika on korjattu ja verkko palautettu normaalitilaan. Käytännössä verkkoyhtiöiden ei ole kannattavaa pitää jatkuvasti suurta henkilöstöä suurhäiriövalmiudessa. Toimivat varamiespalvelut sekä alan toimijoiden yhteistyö ja voimavarojen keskittäminen ovat merkittäviä organisaatioiden kehityskohteita. (Verho ym. 2010, 19-32)

2.6 Sähköverkon toimintavarmuuden tulevaisuuden haasteita

Sähköverkon sähköenergian riittävyys kulutushuippuina on vakava haaste lähitulevaisuudessa. Erityisesti kylmien talvikuukausien aikana ostosähkön hinta voi nostaa sähkön kuluttajahintoja huomattavasti. Päästökaupan seurauksena Suomesta poistuu tulevana vuosina fossiilisia polttoaineita käyttäviä tuotantolaitoksia kannattamattomina. Tämä tarkoittaa merkittävää osaa nykyisen sähköntuotannon varareservin poistumisena. (Nylund 2015.)

Vuosina 2014 - 2016 poistuu Suomesta yhteensä 1600 MW sähköntuotantoa Pohjolan Voiman mediatiedotteen mukaan. Fortumin Inkoon lauhdevoimalaitos suljettiin vuonna 2014, Pohjolan Voiman Mussalon laitos Kotkassa on purettavana, Kristiinankaupungin ja Vaasan öljylauhdevoimalaitokset suljetaan vuoden 2015 loppuun mennessä ja lisäksi Kristiinankaupungin ja Tahkoluodon hiililauhdelaitoksia uhkaa sulkeminen kannattamattomina. (Nylund 2015; Hirvonen 2015, 4)

Tulevaisuudessa tuulivoiman, aurinkovoiman, CHP-laitosten ja muiden mikrotuotantotapojen yleistyessä asettavat uudet tekniikat enenevissä määrin haasteita sähkönsiirtoverkon hallintaan. Puhutaan älykkäistä verkoista, jotka ohjautuvat tarvittaessa itse saarekkeiksi ja liittyvät vian poistuttua automaattisesti valtakunnan verkkoon. Kuvassa 2 on esimerkki hajautetusta sähköntuotannosta ja sen kytkeytymisestä sähköverkkoon.



Kuva 2. Hajautetun energiantuotannon integrointi sähköverkkoon. (Hirvonen 2013, 9)

Huoltovarmuuden kannalta mikrotuotantoalueet ovat hyvä ratkaisu varmistamaan alueellisesti väestölle selviytymismahdollisuudet sähkön tuotannon häiriötilanteissa. Mikrotuotantoon liittyviä haasteita ovat muun muassa saarekeverkon tehotasapainon säilyttäminen. Kun mikrotuotantosaarekkeessa ei ole merkittävää energiavarastoa tai pyörivien koneiden hitausmassoja, voivat nopeat kuormitusten kytkeytymiset ja irrottautumiset verkosta aiheuttaa ongelmia. Tällaisessa heikossa verkossa nopea sähkön kulutuksen muutos aiheuttaa tehotasapainoon heilahteluja. Valtakunnan verkkoon liitettyjen voimalaitosten voimakoneisiin liittyy suuret hitausmassat ja nämä hitausmassat tasaavat ja vaimentavat nopeita kulutuksen muutoksia. Tällaista verkkoa kutsutaan jäykäksi verkoksi, eikä kuormitusten muutokset ja vaihtelut aiheuta suurempia ongelmia sähköverkkoon. (Hirvonen 2013; Mörsky & Mörsky 1994, 105-110, 143; Verho ym. 2010, 45)

3 SÄHKÖVERKON TOIMINTA

Teollisessa sähköntuotannossa käytetään yleisesti tahtigeneraattoreita. Voimansiirtoverkkoon kytketyt generaattorit käyvät samalla sähköisellä kulmanopeudella siten, että verkon taajuus on 50 Hz. Tällöin generaattorit antavat verkkoon voimansiirtokoneensa määräämän tehon. Mikäli tehotasapaino jostain syystä häiriintyy esimerkiksi äkillisen kuormituksen muutoksen seurauksena, koneen pyörimisnopeus muuttuu. Jos kuormitus kasvaa, pyörii generaattori hitaammin. Jos kuormitus pienenee, pyrkii generaattori pyörimään nopeammin. Mikäli häiriön aiheuttama muutos ylittää tai alittaa sallitut raja-arvot, kone joutuu epätahtikäyttöön ja putoaa verkon tahdista. Suojauksien on toimittava nopeasti, jotta generaattori irtoa verkosta ja vaurioituminen estyy. (Laiho & Elovaara 2007, 89)

Sähkön hyvän laadun kannalta on tärkeää, että sähköverkon jännitteiden taajuuDET ja jännitteiden itseisarvot pysyvät sovituiSSa rajoissa. Tällöin verkon pätö- ja loistehotasapainot säilyvät. (Mörsky & Mörsky 1994, 65)

3.1 Verkon käyttötavat

Sähkönjakeluverkkojen toimiessaan erillisinä saarekkeina ilman yhteyttä laajempaan verkkoon, kutsutaan käyttöä saarekekäyttöiksi. Myös termejä erilliskäyttö ja saarikäyttö käytetään laajasti. Kun hajautetut verkot yhdistetään yhteiseksi verkoksi, kutsutaan sähköverkon käyttöä yhteiskäytöksi. Voimalaitokset tuottavat pätötehoa verkon välityksellä yhteiskäytössä verkkoon kytketyille kuormituksille. Suomessa sähkönsiirtojärjestelmän yhdentyminen alkoi juuri alueellisista yhteiskäyttöverkoista, jotka myöhemmin yhdistettiin valtakunnallisiksi kantaverkoiksi. Pohjoismaiseen yhteiskäyttöverkkoon Suomi liittyi vuonna 1959. (Mörsky & Mörsky 1994, 11; Elovaara & Partanen 2007, 31)

Suurilla yhteiskäyttöverkoilla saavutettuja etuja ovat muun muassa jännitteen taajuuden pysyminen tavoitearvossaan ja stabiilina, sähkönjakelun varmistami-

nen ja lisäksi sähkön tuotannon teknistaloudellisen kannattavuuden ja voimalaitosten käyttöasteen kasvaessa toiminnan optimointi on tehokkaampaa. (Mörsky & Mörsky 1994, 11)

Hajautetulla tuotannolla mahdollistetaan saarekekäytöt. Etua erillisverkkokäyttömahdollisuudesta on muun muassa suurhäiriötilanteissa, jolloin voidaan erillisille saarekealueille tuottaa sähköä suurhäiriöstä huolimatta. Tämä lyhentää sähkökatkosten kestoaikaa ja varmistaa kriittisten toimintojen ylläpidon myös kriisitilanteissa. (Verho ym. 2010, 31)

3.2 Hajautettu tuotanto

Hajautetulla teollisella sähköntuotannolla tarkoitetaan tilannetta (kuva 2), jossa sähköä voidaan tuottaa verkkoon maantieteellisesti laajalla alueella. Vesivoimalaitokset sijoitetaan virtaavien vesistöjen varsille suuren putouskorkeuden mahdollistaessa optimaalisen tehotuoton. Ydinvoimalaitokset ja lauhdevettä tarvitsevat voimalaitokset sijoitetaan suurten jäähdytysvesialtaiden läheisyyteen, yleensä rannikolle. Turvevoimalaitokset sijoitetaan kasvukeskusten tuntumaan, sinne missä kulutustarve on suuri, mutta toisaalta etäisyyksien tulee olla kohtuulliset turvetuotantoalueille. Sama pätee myös biomassaa ja jätettä polttaviin voimalaitoksiin. Hajautettuna tuotantona voidaan myös pitää sellaista sähköntuotantoa, joka sijoittuu lähelle kuluttajaa.

Tuulivoimaloita kannattaa sijoittaa sinne, missä ilmastolliset olosuhteet ovat optimaalisimmat. Aurinkovoimaloiden sijoittaminen hajautettuina tuotantomuotoina tulee yhä kannattavammaksi teknologian kehittymisen myötä, vaikka talvikuukausien sähköntuotto onkin minimaalista. Kauppakeskukset, julkiset palvelut ja kotitaloudet tarvitsevat kesäisin sekä käyttöveden lämmitystehoa että tilojen jäähdytystehoa. Katoille sijoitetut aurinkopaneelit voivat tuottaa kiinteistöjen tarvitseman sähköenergian kesäkuukausina. Toisaalta edellä mainitun kaltainen omavaraisuuden kasvu sähkön suhteen voi johtaa huoltovarmuusreservin pienentymiseen talvikuukausina.

Hajautettu tuotanto ja tuotannon verkko-ohjaustekniikan kehittyminen voivat parantaa verkon viansietokykyä. Hajautetussa sähköntuotannossa on etuna verkon käyttö saarekkeina kriisitilanteissa. Hajautetun verkon saarekekäyttö edellyttää hyvää verkon hallintaa ja automaatiota. Älykäs verkko – Smart Grid – tekniikka kehittyessään tulee muuttamaan sähköverkon käyttöä ja rakennetta tulevaisuudessa. Esimerkkinä voisi mainita kotona seurattavan reaaliaikaisen sähkönkulutuksen ja sähkönn hinnan suhdetta mahdollistavan seurantatekniikan ohjaavan vaikutuksen kuluttajan omaan kulutuskäyttäytymiseen. Hajautetut tuotantoalueet voivat erkaantua omiksi saarekealueikseen kantaverkon suurhäiriössä tai laajamittaisen jakeluverkon häiriötilanteessa. (Energiateollisuus 2014; Partanen ym. 2010, 147,148)

Kahteen suuntaan toimiville pienvoimaloille verkkoyhtiö asettaa tiukemmat tekniset vaatimukset kuin niille kuluttajille, jotka ottavat vain kulutustehoa verkosta. Pienvoimala muuttuu turvallisuusriskiksi, kun se jää syöttämään verkkoa yksinään. Vikaantunut johto-osuus erotetaan yleisestä verkosta, mutta pienvoimala syöttää edelleen sähköä johto-osuudelle ja siten johto on jännitteinen. Sähköturvallisuutta vaarantavia tilanteita syntyy myös, jos erinäisissä vikatapauksissa voimalan suojaus ei toimi oikein tai se sekoittaa jo olemassa olevan jakeluverkonhaltijan verkon suojauksen. Mikäli verkossa on käytössä automaattiset jälleen kytkentälaitteet, on suojaukseen kiinnitettävä erityistä huomiota. Liitettäessä pienvoimalaa verkkoon on taattava riittävä turvallisuus. Suojauksen on erotettava voimala verkosta silloin, kun verkkoa ei syötetä muualta tai, kun verkon jännite katoaa kokonaan tai osittain. Erottaminen on tarpeen muun muassa työturvallisuuden varmistamiseksi. Pienvoimala ei saa huonontaa muiden sähkönsyöttöjärjestelmien turvallisuutta ja oikeaa toimintaa. (Sener 2001, 3, 4, 13)

Verkonhaltija voi hyödyntää hyvin suunniteltua pienvoimantuotantoa verkostohäviöiden vähentämiseksi. Verkkoyhtiöiden haasteena on hyödyntää tuotanto mahdollisimman hyvin ja säilyttää sähköntoimitukseen liittyvät laatutekijät, verkon selkeä käyttö ja turvallisuus. (Sener 2001, 3)

3.3 Taajuuden vaikutus

Verkon pätöteho vaikuttaa taajuuteen. Kun generaattorin verkkoon syöttämän pätötehon roottoria jarruttava vaikutus on yhtä suuri kuin turbiinin sitä akselin kautta kiihdyttävä vaikutus, ovat generaattori ja turbiini pätötehotasapainossa. Generaattorin pyörimisnopeus on tasainen ja sitä kautta verkon taajuus pysyy vakiona. Jos generaattori syöttää verkkoon enemmän pätötehoa, on jarruttava sähköinen voima tällöin suurempi kuin turbiinin kiihdyttävä mekaaninen voima. Tämä seurauksena roottorin pyörimisnopeus hidastuu ja jännitteen taajuus pienenee. Pätötehon vaihtelut näkyvät tästä syystä taajuuden vaihteluina. Taajuuden pienestä vaihteluvälin vuoksi täytyy verkkoon kytketyissä koneissa olla riittävästi tehoreserviä. Reservissä olevaa säätövoima jakaantuu normaalikäytön käyttöreserviin ja häiriötilanteiden häiriöreserviin. (Mörsky & Mörsky 1994, 65, 83, 99)

Sähköverkossa jännitteen taajuus on standardin SFS EN 50160 mukaan määriteltä normaaleissa käyttöolosuhteissa pien- ja keskijänniteverkossa. Taulukkoon 1 on kerätty standardin EN 50160 ja Energiateollisuuden suosituksia taajuuden laatuksiteereiksi.

Taulukko 1. Verkon taajuuden laatumäärittely pienjännitteelle. (SFS-EN 50160, Energiateollisuus 2014, 13)

Taajuuden laatu	Hyvä laatu (Energiateollisuus)	Normaali laatu (Energiateollisuus)	SFS-EN 50160:n mukainen laatu
Taajuus (yhteiskäyttöverkossa)	50 Hz \pm 1 %	50 Hz \pm 1 %	99,5 % välillä 50 Hz \pm 1 % kaikki välillä 50 Hz +4% / -6%
Taajuus (erillisverkossa)			95 % välillä 50 Hz \pm 2 % kaikki välillä 50 Hz \pm 15 %

Laatukriteereiden mukaan taajuus saa vaihdella 49,5 Hz – 50,5 Hz välillä yhteiskäyttöverkossa 99,5 % vuodesta. Taajuudelle sallitaan erillisverkossa isompi vaihtelu kuin yhteiskäyttöverkossa. (Energiateollisuus ry 2014, 14)

3.4 Jännitteen vaikutus

Verkon loistehoa säädetään jännitteen avulla. Loistehotasapainossa verkon loistehon tuotanto vastaa loistehon kulutusta. Loistehoa kompensoidaan muuttamalla generaattorin magnetoitua. Loistehon muutos näkyy jännitteiden itsearvon muutoksena. Verkossa loistehon siirto ei ole kannattavaa, ja tästä syystä loisteho pyritään kompensoimaan mahdollisimman lähellä loistehoa tuottavaa kulutuspistettä. Sähkön tuotantolaitokset säätävät jännitetason generaattoreiden magnetoituvirran avulla laatukriteerit täyttäviin arvoihin, eikä valtakunnan verkossa ole erityistä jännitteen säätöreserviä. (Mörsky & Mörsky 1994, 65, 78)

Sähköverkossa jännitteen suuruus on standardin SFS EN 50160 mukaan määriteltä normaaleissa käyttöolosuhteissa pien- ja keskijänniteverkossa. Taulukkoon 2 on kerätty standardin EN 50160 ja Energiateollisuuden suosituksia jännitteen laatukriteereiksi.

Taulukko 2. Pienjänniteverkon jännitteen laadun määrittely. (SFS-EN 50160, Energiateollisuus ry 2014, 14)

Jännitteen laatu	Hyvä laatu (Sener)	Normaali laatu (Sener)	SFS-EN 50160:n mukainen laatu
Jännitetason vaihtelu (pj-verkko, $U_n=230\text{ V}$)	$U_n \pm 4\%$ ja keskiarvo $U_n \pm 2,5\%$	$U_n + 6\% / - 10\%$	95 % välillä $U_n \pm 10\%$ kaikki välillä $U_n \pm 10\% / 15\%$

Laatukriteereiden mukaan 95 % jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvosta tulee olla välillä 207 V – 253 V. Erilliskäytössä (saarekekäytöt) jännitteen laatua ei ole määritetty. (Energiateollisuus ry 2014, 14)

3.5 Tehotasapaino

Voimansiirtojärjestelmän taajuus vastaa tuotannon ja kulutuksen tasapainoa. Jos tehotasapaino vaihtelee suuresti, se näkyy taajuuden vaihteluna ja huonona sähkön laatuna. Osa voimalaitoksista osallistuu tehonsäätöön korjaamalla tehon

epätasapainoa. Satunnaisten kuormitusvaihteluiden lisäksi tehotasoapainoa heiluttaa kulutusennusteiden epätarkkuus ja nykyisin enenevässä määrin ilmastolisten olosuhteiden aiheuttamat verkkoviat. Yhteiskäyttöverkossa on tiedettävä taajuuden lisäksi verkonosasta toiseen johtojen siirtämä kokonaispätöteho. Taajuuden ja siirtyvän kokonaispätötehon avulla tiedetään onko alueen verkko pätötehotasapainossa. (Mörsky & Mörsky 1994, 83)

Hajautetun tuotannon kytkeytyminen verkkoon ja tehotasapainon säätö vaatii hyvää verkon hallintaa ja nopeaa säätöä. Yleisten jakeluverkkojen taajuus määräytyy kantaverkosta. Suurempia taajuuspoikkeamia voi esiintyä esimerkiksi tilanteessa, jossa keskeytyksen aikana jokin yksittäinen voimalaitos jää virheellisesti syöttämään irrotettua verkon osaa. (Energiateollisuus ry 2014,13)

4 MIKROTUOTANTO

Mikrotuotannon määrä Suomessa kasvaa, tarkkoja tehomääriä ei ole tilastoituna tai saatavilla käyttöön. Jonkin asteista arviointia voidaan tehdä sillä perusteella, että energiayhtiöt ovat ripeässä tahdissa ohjeistaneet mikrotuotannon liittymisehtojaan. Lisäksi eräät energiayhtiöt mainostavat mikrotuotantoliittymien liikatehon myyntiä verkkoonsa. Toiset energiayhtiöt suosittelevat mikrotuotannon liittämistä verkkoonsa, mutta eivät tarjoa verkkoon tuotetusta tehosta korvausta.

Verkostosuosituksissa YA9:09 mikrotuotanto määritellään liittymisteholtaan enintään 11,1 kVA sähköntuotantotavaksi ja joka on ensisijaisesti tarkoitettu kohteen omaan käyttöön ja verkkoon syöttö on satunnaista tai vähäistä. Mikrotuotanto on lähinnä yksityisten kuluttajien tai pienyritysten hankkimia sähköntuotantolaitoksia kuten pienet aurinkovoimalat, tuulivoimalat, CHP-laitokset ja vastaavat sähköntuotantojärjestelmät.

” Mikrotuotannon liittymisteho saa olla yksivaiheisena enintään 3,7 kVA ja liittymän maksimisulakekoko saa olla enintään 16 A. Kolmivaiheisena maksimisulakekoko saa olla 3 x 16 A.” (Energiateollisuus ry 2011, 3)

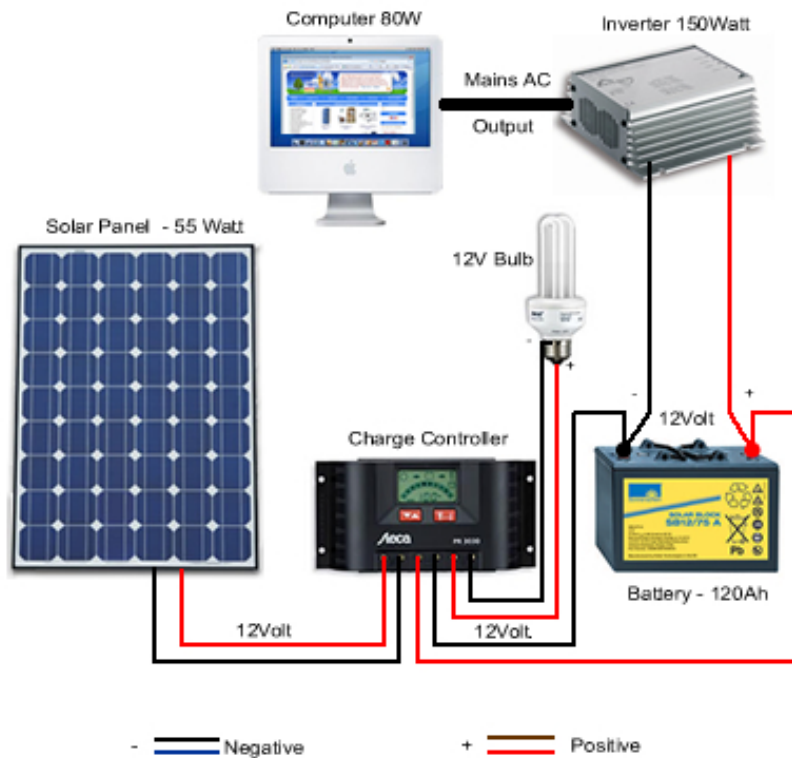
4.1 Aurinkovoimalat

Suomessa on FinSolar-hankkeessa kartoitetun tiedon mukaan arviolta noin 20 MWp aurinkosähköä asennettuna. Laskelmaan sisältyvät verkkoon liitetyt aurinkovoimalat sekä erillään toimivat aurinkovoimalat. Markkinoilta löytyy nykyisin kattava valikoima aurinkopaneelitarjontaa pienistä 12 V itsenäisesti toimivista järjestelmistä suuriin verkkoon liitettäviin järjestelmiin saakka. (Finsolar 2015.)

Aurinkopaneelit valmistetaan piipuolijohteesta. Auringon valo saa aikaan varauksen kuljettajien liikettä puolijohteessa, ja puolijohteen päihin kytkettyjen elektrodien välillä alkaa kulkemaan sähkövirtaa. Yhden solun jännite on 0,5 V – 0,6 V. Paneelin solut kytketään sarjaan, jotta haluttu jännitetaso saadaan aikaan. Aurin-

kopaneelin nimellisteho on se teho, jonka paneeli antaa auringon säteilyn kohdassa paneelin +25 asteen lämpötilassa ja 35 asteen kulmassa, kun auringon säteilyteho on $100 \text{ W} / \text{m}^2$. Tehoa kutsutaan huipputehoksi Wp (Watt peak). Aurinkopaneelin hyötysuhde saadaan jakamalla nimellisteho Wp paneelin pinta-alan ja säteilytehon $1000 / \text{m}^2$ tulolla. Lämpötila vaikuttaa paneelin sähkötuotokkyyn. Lämpötilan laskiessa aurinkopaneelien sähköntuotto nousee ja lämpötilan noustessa tuotto laskee. (Finnwind Oy 2013.)

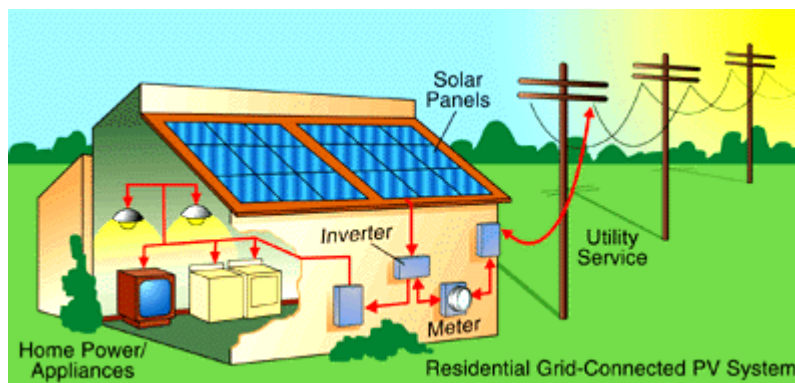
Aurinkopaneelit voidaan kytkeä kiinteistön sähköjärjestelmään joko suoraan tai invertterin välityksellä. Suoraan kytkettyyn järjestelmään liitettävien laitteiden tulee olla jännitetasoltaan aurinkopaneeleille sopivia. Esimerkiksi jos aurinkopaneelit tuottavat 12 V:n tasajännitteen ja maksimissaan 100 W:n tehon, on suoraan liitettävien laitteiden oltava 12 V:n tasajännitelaitteita ja yhteistehon enintään 100 W. Kuvassa 3 on kaupallisen toimijan esittämänä irrallaan verkosta toimiva järjestelmä, jossa on sekä tasasähkölaite että vaihtosähkölaite kytkettynä mikroverkkoon.



Kuva 3. Itsenäisesti toimiva pieni aurinkosähköjärjestelmä. (Mysolarshop 2015)

55 W:n tehoinen aurinkopaneeli on kytketty lataamaan 12 V:n akkua latauksen ohjausyksikön kautta. Samaan ohjausyksikköön on kytketty suoraan 12 V:n merkkilamppu. Akku syöttää invertteriä, joka muuttaa 12 V:n tasajännitteen 230 V:n vaihtojännitteeksi. Invertterin perään voidaan kytkeä esimerkiksi tietokone tai muu sähkölaitte. On huomattava, että akku toimii energiavarastona ja kytketty sähkölaitte voi akun toimintakyvyn rajoissa syöttää isompaa tehoa kuin mitä aurinkopaneelit tuottavat.

Invertteri muuttaa aurinkopaneelien tuottaman tasasähkön vaihtosähköksi. Yleensä tuotettu jännite on 230 V yksivaiheisena. Kolmivaiheiset järjestelmät kykenevät tuottamaan suuremmat tehot.



Kuva 4. Kiinteistön mikrotuotantolaitteiston liittäminen sähköverkkoon (Eterna-lenergy 2015)

Kuvassa 4 on periaatteellinen kiinteistön liityntä verkkoon. Aurinkopaneelien tehoa käytetään inverttereiden muutamana vaihtosähkölähteenä kiinteistön sähkölaitteille. Ylijäävä sähköenergia syötetään mittauksen kautta verkkoon. Mittarin on oltava kahteen suuntaan lukeva mittari, joka rekisteröi sekä verkosta otetun energian että verkkoon syötetyn energian.

Verkkoon liitettävältä aurinkosähköjärjestelmästä edellytetään alueen verkkoyhtiön lupaa. Ennen laitteistojen hankintaa on hyvä ottaa yhteyttä alueen rakennusvalvontaan ja alueen verkkoyhtiöön, jotta yllätyksiltä säästytään laitteiston käyttöönoton yhteydessä. Rakennusvalvonta voi edellyttää alueella toimenpidelupaa.

Verkkoon kytkettyjen vaihtojännitteisten aurinkosähköjärjestelmien sähkötyöt saa tehdä vain yritys, jolla on sähköasennusoikeudet, ja järjestelmille on tehtävä käyttöönottotarkastus. Sähköurakoitsijan on aina itse tarkastettava asennukset ennen käyttöönottoa. Työn teettäjän kannattaa vaatia urakoitsijalta tarkastuspöytäkirja sähköasennusten käyttöönottotarkastuksesta. (Motiva 2014a.)

Tavallinen sähkönkäyttäjä saa tehdä enintään 50 V:n vaihtojännitteellä ja enintään 120 V:n tasajännitteellä toimivien sähkölaitteistojen asennus- ja korjaustöitä, jos hän on perehtynyt töihin sekä niitä koskeviin turvallisuusvaatimuksiin.

Kun suunnittelee aurinkopaneelien asennusta omaan kiinteistöön, kannattaa tutustua Motivan nettisivustoihin. Sieltä löytyy tietoa aurinkosähköjärjestelmän hankinnasta, asentamisesta ja käytöstä sekä lainsäädäntöä, yleisohjeita ja vaadittavat lupamenettelyt. (Motiva 2014a)

Energiateollisuuden suosittelema yleistietolomake ” Mikrotuotantolaitteiston liittäminen verkkoon” – täytetään ja toimitetaan verkkoyhtiölle.

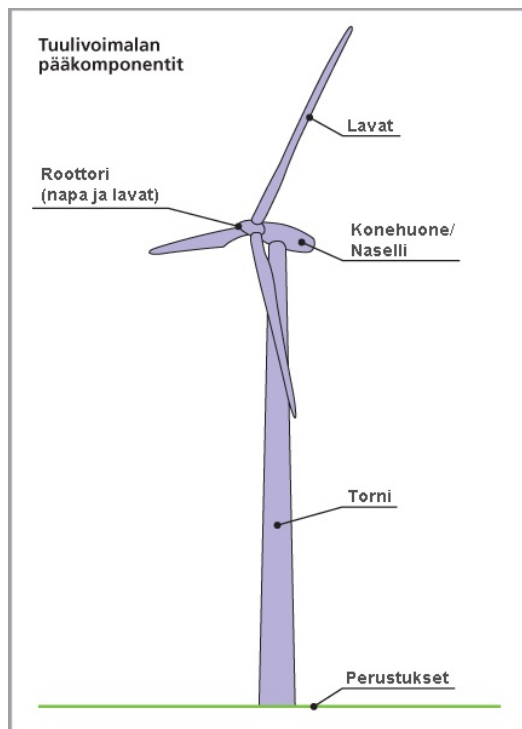
4.2 Tuulivoimala

Tuulivoima on uusiutuva ja saasteeton luonnonvara. Tuuliturbiineissa muutetaan ilmavirtauksen liike-energia sähköksi. Tuulivoimalla tuotettu sähköenergian määrä on riippuvainen tuuliolosuhteista. Tuulivoimalaitos vaatii käynnistykseen 3,5 m / s tuulen. Laitoksen teho lisääntyy tuulen nopeuden kasvaessa. Suurilla tuulen nopeuksilla (yli 25 m/s) tuulivoimalaitos pysäytetään, jotta laitteistot eivät rikkoontuisi. Tuulivoimalan käyttöikä on 20 – 25 vuotta ja laitokset toimivat automaattisesti. Huolto- ja kunnossapito vaatii asennusaikaisten töiden lisäksi työpanosta. (Tuulivoimayhdistys 2014.)

Suomessa tuulee talvikuukausina selvästi enemmän kuin kesäkuukausina. Suomen alueista merirannikot, suuret järviolueet ja tunturiylängöt ovat tuulisimpia alueita. (Suomen tuuliAtlas 2010.)

Tuulivoiman tuotantolaitteistoista löytyy aurinkosähkön tuotantolaitteistojen tavoin tarjontaa pienistä yksityiskäyttöön tarkoitetuista teholuokista suuriin megawattien voimaloihin. Suuria teholuokkia kutsutaan teolliseksi tuulivoimaksi ja alle 50 kVA voimaloita pientuulivoimaksi.

Vuoden 2014 lopulla oli Suomessa 260 tuulivoimalaa. Näiden yhteenlaskettu teho oli 627 MW. Suunnitteilla olevia hankkeita on 11 000 MW edestä. EU:n alueella tuulivoimaa on asennettu enemmän kuin mitään muuta energiantuotantomuotoa. EU-maiden yhteinen kapasiteetti oli vuoden 2013 lopulla 117,3 GW. (Tuulivoimayhdistys 2014.)

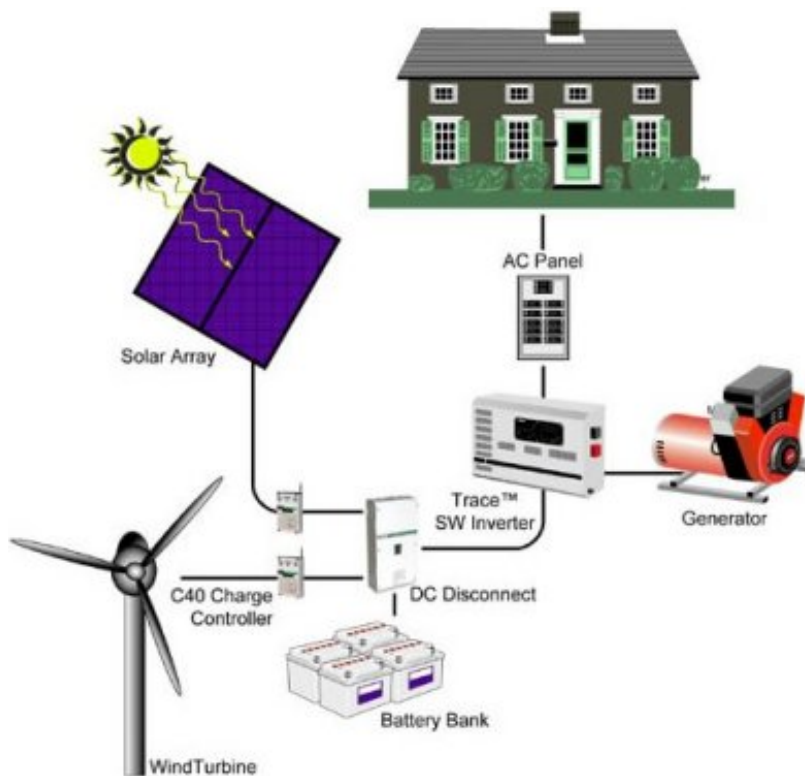


Kuva 5. Tuulivoimalan rakenne. (Tuulivoimayhdistys 2014)

Tuulivoimalalaitteistossa on roottori (napa ja lavat), konehuone, torni ja perustukset. Tuulipuistoalueella on useita toisiinsa liitettyjä tuulivoimaloita, jotka kytkeytyvät yhtenä kokonaisuutena sähköverkkoon.

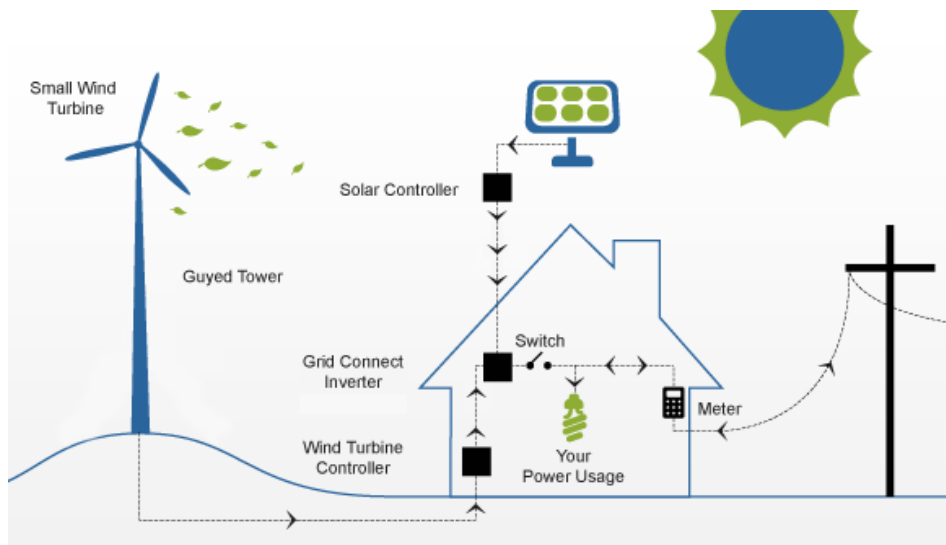
Tuulivoiman rakentamista suunnittelevan kannattaa tutustua Tuulivoimayhdistyksen nettisivuihin. Sivuilta löytyy suunnitteluun, hankintaan ja lupamenettelyyn tarvittavaa ohjeistusta.

Tuulivoiman käyttö sähköntuotantoon voidaan toteuttaa saarekkeena tai verkkoon liitettynä. Kuvassa 6 on Appleseed Energyn esittämä periaatteellinen ratkaisu maatalan tai eristetyllä alueella olevan kiinteistön sähkön omavarainen jakelujärjestelmä. Tuulivoimalla ja aurinkosähköllä tuotetaan tilan sähköenergia ja ylijäämä varastoidaan akustoihin. Tarvittaessa varavoimana on fossiilisilla polttoaineilla tai biopolttoaineilla toimiva generaattori.



Kuva 6. Saarekkeena toimivan tilan sähköjärjestelmä. (Appleseed Energy 2011)

Tuulivoiman liittäminen yleiseen sähköverkkoon vaatii kaksisuuntaisen mittauslaitteiston. Kuvassa 7 on kaupallisen toimijan näkemys verkkoon liitetystä pienvoimalasta, jossa sähköä tuotetaan hybridiratkaisuna aurinkopaneelien ja tuulivoiman avulla tai näiden ollessa riittämättömiä kiinteistön sähkön kulutukseen, otetaan energia yleisestä sähköverkosta.



Kuva 7. Verkkoon kytketty pientuulivoimala. (Nashcam 2015)

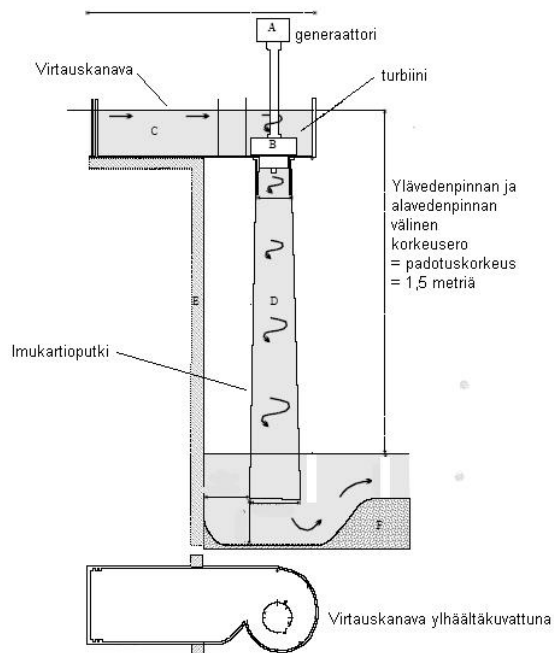
Tuulivoimatuotannon yleistyessä tuulivoiman kytketyminen verkkoon ja irti verkosta voi aiheuttaa sähkön laadun heikkenemistä, jollei sähköverkon hallinta ole hyvällä tasolla.

4.3 Pienet vesivoimalat

Pienvesivoimalat soveltuvat hyvin hajautetun sähköntuotannon vaatimuksiin. Pienvesivoima paikallisena sähköntuotantona parantaa sähkön käyttövarmuutta alueella. Paikalliset pienvoimalat sopeutuvat yleensä hyvin ympäristöönsä, joten niiden aiheuttamat maisemalliset ja ekologiset vaikutukset ovat pieniä. Pienvesivoimalaitoksien teholuokka on 1-10 MW ja minivesivoimalaitoksien teholuokka on alle 1 MW. Koko valtakunnan vesivoimalla tuotetusta sähköntuotannon osuudesta minivesivoiman osuus on noin yksi prosentti ja pienvesivoiman osuus noin kahdeksan prosenttia. Suomessa on 67 kpl minivesivoimalaitoksia ja 83 kpl pienvesivoimalaitoksia. (Motiva 2014b, Energiategollisuus ry 2015a.)

Kiinnostus pienvesivoiman käyttöönottamiseksi on kasvanut, kun ilmastonmuutoksen torjumiseksi fossiilisten polttoaineiden tilalle etsitään korvaavia energialähteitä. Vesivoimapotentiaalia on Suomen suojelemattomissa vesistöissä käyttämättömänä noin 663 MW ja 2 352 GWh/a. (Motiva 2014b.)

Kuvassa 8 on esitetty pienen kaupallisen saatavilla oleva generaattorin rakenne. Putouskorkeus on oltava 1,5 m ja virtaama 30 – 130 l / s sallittuun jatkuvaan kuormitukseen tehoalueella 200 – 1000 VA.



Kuva 8. Pienvesivoimageraattorin vaatima putouskorkeus on 1,5 metriä (Saukkolan Voima)

Generaattorityyppinä laitteistoissa on 1 – vaiheinen 6-napainen kestopagneetti-generaattori. (Saukkolan Voima)

4.4 CHP-laitokset

Sähkön- ja lämmön pienen kokoluokan yhteistuotantolaitoksella tarkoitetaan yleensä pienvoimalaa, jonka sähköntuotantoteho on 1 - 2 MW. Lämpötehona laitoksesta saadaan tällöin 3 - 5 MWh. Joissakin lähteissä pien - CHP- laitoksen ylimmäksi nimellistehoksi katsotaan 10 MW. Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon etuna on korkea kokonaishyötysuhde. Sähköntuotannon osuus vaihtelee 30 % molemmiin puolin käytetystä tekniikasta riippuen.

Pien-CHP – laitoksia toteutetaan neljällä eri perustekniikalla. Näitä ovat polttomoottori- ja kaasuturbiinilaitokset, höyryturbiinit ja muut höyryvoimalaitteilla toteutetut laitokset, polttokennolaitokset ja muilla välittäjäaineisiin liittyvällä tekniikalla toteutetut laitokset. (Motiva 2014c.)

Edellä kuvatuista tekniikoista yhdessä erilaisten polttoaineiden kanssa syntyy suuri määrä erilaisia ja eri kehitysvaiheessa olevia voimalaitosratkaisuja. Jotkut niistä ovat jo hyvin toimivia ja toiset niistä juuri kaupallistamisvaihetta saavuttamassa. Lupaavia tekniikoita on kehitystyön kohteena ja uusia materiaalearatkaisuja etsitään. (Motiva 2014c.)

4.5 Polttokennot

Polttokennotekniikalla on pitkät perinteet. Päästökauppa ja energiatehokkuus sekä uusiutuvien luonnonvarojen hyödyntäminen sähköntuotannossa on aktivoinut polttokennotekniikan kehityksen uudelleen ajankohtaiseksi. Polttokenno on nykyaikainen tapa tuottaa sähköä tehokkaasti ja pienillä päästöillä lähes missä tahansa. Polttokennot eivät ole riippuvaisia sääolosuhteista, vaan toimivat niin kauan kuin niihin syötetään polttoainetta kuten vetyä, biokaasua, maakaasua, metanolia tai dieseliä. Markkinoilla olevia polttokennoja käytetään mm. ajoneuvojen teholähteinä sekä kotien ja suurten kiinteistöjen perusvoimantuotannossa. Polttokennojen etuina ovat luotettavuus ja korkea sähköntuotannon hyötysuhde. (Motiva 2014d.)

4.6 Mikrotuotantoverkon saarekekäytön ylläpito

Saarekekäytöissä sähkön laatukriteerit eivät ole niin tiukkoja kuin yhteiskäytöissä, kuten kappaleen 3 taulukoista 1 ja 2 havaitaan. Saarekekäyttöihin liittyy tehotasapainon ylläpidon haaste. Mikäli saarekekäytön verkko on heikko, näkyvät kulutuksen kytkeytymiset ja irrottautumiset verkosta välittöminä sähkön laadussa. Heikolla verkolla tarkoitetaan sellaista verkkoa, jossa tehonmuutokset näkyvät jännitteen ja taajuuden muutoksina verkossa. Häiriöt voivat näkyä välkyn-

tänä, ali- tai ylijännitteinä, ali- tai ylitaajuuksina ja pahimmassa tapauksessa verkon kaatumisena. Häiriöistä tarkemmin käsitellään taajuuden, jännitteen ja tehohailahtelujen vaikutuksia sähkön laatuun ja tehotasapainon ylläpitoon.

Heikkoa verkkoa voidaan vahvistaa valitsemalla energialähteiksi suurta hitausmassaa omaavat voimakoneet generaattorin akselille. Tuulivoimatuotannon riippuvuus sääolosuhteista ja toisaalta kulutuksen vaihtelu vaativat yleensä tehotasapainon ylläpitoon energiavarastot. Tällaisina energiavarastoina voidaan käyttää akustoja tai pumppuvoimaloita. Keski-Euroopassa käytetään yleisesti pumppuvoimaloita. Pumppuvoimaloiden yläaltaan vesi pumpataan silloin kun energiaa on saatavilla, esimerkiksi päiväaikaan auringon avulla. Yöllä, kun aurinkosähköä ei ole saatavilla, juoksutetaan yläaltaan vesi voimalan läpi ja tuotetaan yöajan kulutussähkö vesivoiman avulla.

4.6.1 Taajuuden säätö

Kuten valtakunnan kantaverkon taajuuden ylläpidossa, vaikuttavat samat sähkötekniset lainalaisuudet mikrotuotannon saarekekäytössä. Mikäli saarekeverkossa kulutetaan sähköä enemmän kuin tuotetaan, on seurauksena taajuuden laskeminen. Vastaavasti, jos sähköä tuotetaan saarekeverkkoon kulutusta enemmän, taajuus nousee. Valtakunnan verkon taajuuden säätö tapahtuu taajuuden säätöreservin avulla. Säätöreservinä toimii joko ostosähkö naapurimailta tai varavoimageneraattorit, jotka käynnistetään tarvittaessa tuottamaan lisää tehoa verkkoon. (Fingrid Oyj 2015.)

Saarekekäytössä yhteyttä muuhun verkkoon ei ole, joten taajuuden säätömahdollisuudet jäävät saarekekäytössä kulutettavan tehon rajoittamiseen ja varavoimageneraattorin, akuston tai vastaavan energiavaraston käyttöön.

4.6.2 Jännitteen säätö

Valtakunnan verkossa voimalaitokset säätävät generaattoreiden napajännitteen $\pm 5 \%$ generaattorin nimellisjännitteestä, muuntajat säätömuuntajien käämikytkinten avulla noin $\pm 15 \%$ ja pienjännitejakelumuuntajat väliottokytkimellä $\pm 5 \%$. Kun induktiivinen loisteho verkossa kasvaa, jännite pienenee. Tällöin verkkoon on tuotettava kapasitiivista loistehoa, jotta jännite nousee. Kapasitiivinen loisteho verkossa aiheuttaa jännitteen nousua, joka voidaan eliminoida tuottamalla verkkoon induktiivista loistehoa. (Elovaara & Laiho 2007, 119)

Jännitteen säätöön saarekekäytössä voidaan käyttää automaattista jännitteen säätöä. Jännitteensäätäjä ohjaa suoraan generaattorin napajännitettä. Akusto tai superkondensaattori tasaa ja vaimentaa saarekeverkon nopeita jänniteheilahteluja.

4.6.3 Tehonheilahtelut ja yliaallot

Tehon kytkeytyminen ja nopeat kuormitusmuutokset näkyvät sähköön laadussa jännitteen muutoksina. Jos saarekekäytössä on vain yksi voimala, on jännitteen ja taajuuden laadun ylläpidossa haasteita. Jännite voi kasvaa liian suureksi, jos sähköntuotantoa on paljon ja kulutusta vähän. Tilanne on päinvastainen kulutuksen kasvaessa ja tuotannon pysyessä vakiotasolla. Tällöin saarekeverkon jännite laskee. Tuulisena vuorokaudenaikana tai aurinkoisena päivänä ylimääräinen tuotettu sähköenergia on varastoitava esimerkiksi akkuihin.

Tuulivoiman tuottamassa sähkössä näkyvät nopeat tuulen puuskien aiheuttamat muutokset tuuliturbiinien ulostuloissa. Mekaaniset muutokset näkyvät generaattorin toiminnan muutoksina. Heilahtelut aiheuttavat muutoksia jännitteessä ja taajuudessa, ja näkyvät sähkölaadun häiriöinä kuten valojen vilkuntana. Kuten yleisessä sähköverkossa myös saarekekäytössä verkon sähkölaadun kriittiset tekijät ovat järjestelmän taajuus, tehotasapainon ylläpito, jännitteen stabiilisuus ja yliaallot.

Saarekejärjestelmän taajuus riippuu tuotetun ja kulutetun sähkötehon tasapainosta. Jos tuotantoa on enemmän, taajuus kasvaa. Pätö - ja loistehojen tasapainot on säilytettävä. Järjestelmän jännitetaso ylläpitämiseksi voidaan säätö toteuttaa tehoelektroniikan avulla moduloimalla pyörivän generaattorin kenttää. Verkon generaattorit ja verkkoon kytkettävät laitteet aiheuttavat yliaaltoja. Yliaallot tulee suodattaa sallituille tasoille. (Sener 2001.)

4.7 Energian varastointi

Sähköenergia voidaan varastoida joko suoraan sähköisenä muotona tai välillisenä muotona. Fossiilisia energialähteitä on totuttu pitämään energiavarastoina, samoin biomassaa ja vesivoimaa. Sähkön varastointitekniikat voidaan jaotella toimintaperiaatteiltaan sähköisiin, sähkökemiallisiin, kemiallisiin ja mekaanisiin varastointiteknologioihin. Sähköisiä varastointimuotoja ovat superkondensaattorit ja suprajohtavan magneettisen energian varastot. Sähkökemiallisina varastoina toimivat erityyppiset akut. Vetyvarastot edustavat kemiallista varastointiteknologiaa. Mekaanisia varastoja ovat pumppuvesilaitokset, paineilmaparastot ja vauhtipyörät. (Alanen 2003, 4)

Pitkäaikaiseen varatehon käyttöön soveltuvat pumppuvoimalat ja paineilmaparastot. Teknologioilla voidaan varastoida suuria tehomääriä ja purkausajat voivat olla pitkiä. Vauhtipyörät ja superkondensaattorit soveltuvat lyhytkestoisiin sähkötehon tasauksiin, varavoimaan ja sähkön laadun parantamiseen. Akku- ja vetyteknologiat ovat voimakkaan kehitystyön kohteena. Litiumioniakuilla on suuri energiatiheys. Hyvän hyötysuhteen lisäksi litiumioniakut ovat pitkäikäisiä. Litiumioniakut sopivat hyvin pitkäaikaiseen varastointiin, sillä niiden itsepurkaustason on alhainen. Helsinkiin suunniteltu Suomen ensimmäinen megawattiluokan akkuvarasto perustuu litiumioniakkuihin. (Alanen 2003, 4)

5 OPETUSYMPÄRISTÖ JA MITTALAITTEET

Opetusympäristö laitteistoineen selostetaan kokonaiskuvan muodostamiseksi ja sähkövoimalaboratorion verkon havainnollistamiseksi. Ympäristöä voidaan käyttää monipuolisesti ja usealla eri tavalla. Kaikkia käyttömahdollisuuksia ei tässä työssä käydä läpi. Kokonaiskuvan avulla opinnäytetyön lukija saa käsityksen työn kohteena olevan saarekekonvertterin liittynnästä laboratorion sähkönjakelujärjestelmään ja paremman ymmärryksen järjestelmän käyttömahdollisuuksista.

5.1 Sähkön tuotannon, siirron ja jakelun laitteistot

Sähkövoimatekniikan laboratoriojärjestelmän muodostaa kiinteistön nousukeskukseen kytketyt 110 kV:n kytkinkentän kojeisto, saarekekonvertteri, älykäs väyläohjattu moottorikeskus, sähköautonlatausasema, 3,2 kW:n aurinkovoimala ja muutama vanhempaa tekniikkaa edustava sähkökeskus.

110 kV:n kytkinkentältä on silmukoitu yhteys 10 kV:n keskijännitekojeistolle. Kuvassa 9 vasemmassa reunassa on kojeiston apusähkökeskus. Kytkinkentän ohjauskojeiston oveen on mallinnettu vanhalla niin sanotulla mosaiikkitaulumaisella esitystavalla jännitteen eri syöttömahdollisuuksia.



Kuva 9. Sähkövoimatekniikan laboratorion 110 kV kytkinkentän ohjauskojeisto.

Keskijännitekojeistoon on liitetty 32 kVA:n generaattorilähtö, moottori- ja muuntajalähdöt sekä 20 kV:n ilmajohtolinja etäohjattavine erotinasemineen. MicroScada - sähkölaitosautomaatiojärjestelmällä voidaan ohjata valvomosta käsin tai etäohjauksella verkon yli laboratorion sähköverkkoa. Sähköturvallisuussyistä laitteistoissa käytetään 400 V:n jännitetasoa.



Kuva 10. 10 kV keskijännitekojeisto.

Kj-kojeiston oikeassa reunassa on johtolähtö (kuva 10), seuraava vasemmalle tultaessa on muuntajalähtö, seuraavina moottorilähtö, sitten generaattorilähtö ja mittauskenttä. Kuvassa äärimmäisenä vasemman on syöttökenttä.

10 kV:n kj-kojeiston johtolähdön suojana toimii ABB:n REF615, moottorilähdössä ABB:n REM615 ja muuntajalähdössä ABB:n RET615 sekä generaattorilähdössä ABB:n REG630 suojareleet. 110 kV:n kytkinkentän suojina toimivat VEO:n VAMP50 ja ABB:n RET615 sekä differentiaalisuojina ABB:n REF630 ja Siemensin Siprotek UT615. Generaattorin tahdistus verkkoon voidaan toteuttaa generaattorin ohjausyksiköltä ja 10 kV:n kojeistolta joko automaattisesti tai manuaalisesti. Testahuoneessa on tuulivoimasimulaattori, jossa on mahdollisuus käyttää joko 7,5 kW:n tai 11 kW:n moottorigeneraattoriyhdistelmää.

Liitteessä 1 on yllä esitetyn sähköjärjestelmän pääkaavio. Pääkaaviosta näkyy 110 kV / 10 kV laitteistojen liityntäpiste NK102/A03, jonka kautta laboratorioverkko on yhteydessä kiinteistön pääkeskukseen ja siten paikalliseen jakeluverkkoon.



Kuva 11. Nocartin valmistama saarekekonvertteri.

Saarekekonvertteri (kuva 11) on kytketty nousukeskuksen NK102/D03 ja sieltä kiinteistön pääkeskuksen kautta paikalliseen jakeluverkkoon.

Laboratorion sähköverkkoon voidaan muodostaa saareke joko 32 kVA:n generaattorin avulla 10 kV:n keskijännitekojeistolle tai saarekekonvertterin avulla. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan ja perehdytään saarekekonvertterin käyttöön saareke- ja yhteiskäyttöverkossa sekä saarekekonvertterin ominaisuuksiin.

5.2 Sähkötyöturvallisuus

Sähköalan koulutuksen turvallisen oppimisympäristön toteuttamisen edellytyksenä on sähköturvallisuuslain noudattaminen. Perusvaatimuksena laboratorio-työskentelyyn ovat voimassa olevat SFS6002 sähkötyöturvallisuuskoulutuksen suoritus hyväksytysti ja ensiapukoulutus tai vähintään hätäensiapukoulutus. Laboratoriossa työskenneltäessä noudatetaan yleisiä työturvallisuutta, koneturvallisuutta ja oppilaitoksen muita turvallisuutta koskevia määräyksiä ja säännöksiä.

Sähkötyötiloissa työskenneltäessä työstä vastaa työnaikaisen sähköturvallisuuden valvoja. Työturvallisuus on jokaisen vastuulla ja töiden suorittaminen edellyttää vastuullisuutta henkilövahinkojen ja laite- ja omaisuusvahinkojen välttämiseksi. Jokaisella toimintaan osallistuvalla henkilöllä on velvollisuus toimia vaaratilanteessa. Perekdytys toimintaympäristöön ja laitteistojen turvalliseen käyttöön on välttämätön edellytys työskentelyllä laboratorioympäristössä.

Laboratoriotiloissa tapahtuvaa koulutusta ohjaavat ja säätelevät seuraavat lait, asetukset ja päätökset:

- KTM: Sähköturvallisuuslaki (410/1996)
- KTM: Sähköturvallisuusasetus (498/1996)
- KTM: Valtioneuvoston asetus sähkölaitteiden ja -laitteistojen sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta (1466/2007)
- Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähköalan töistä (516/1996)
- Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteistojen käyttöönotosta ja käytöstä (517/1996)
- Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteiden turvallisuudesta (1694/1993)
- Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteiden turvallisuudesta (1193/1999)

Edellä esitettyjen lisäksi noudatetaan Turvallisuus- ja kemikaaliviraston Tukesin ohjeita:

- Sähkölaitteistot S4 – 2011
- Sähkötöitäkoskeva toimintailmoitus S7-2012
- Sähkölaitteistojen turvallisuutta ja sähkötyöturvallisuutta koskevat standardit S10-2012

Edellä esitettyjen lisäksi noudatetaan sähkötöihin liittyviä standardeja:

- Pienjännitesähköasennukset SFS 600-1 käsikirja (SFS 6000)
- Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot SFS 6001 + A1 + A2
- Sähkötyöturvallisuus SFS 6002

Listaan lisätään vielä sähköalan julkaisut ja muut tietolähteet kuten:

- D1-2012 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry:n julkaisu)
- Sähköalan säännökset (Henkilö- ja yritysarviointi Seti ry:n julkaisu)
- ST-ohjeisto 6: Sähkölaittekorjaajan opas (Sähkötieto ry:n julkaisu)
- ST-kortisto (Sähkötieto ry:n julkaisu)

Lisäksi oppikirjat ja opetusvideot (Opetushallitus, STEK & STUL 2013)

5.3 Mittauslaitteet

Sähköverkon sähkön kulutukseen ja sähkön laadun tarkkailuun tarvitaan asianmukaiset ja nykyaikaiset mittavälineet. Sähkölaboratoriahankkeessa investoitiin uusiin mittalaitteisiin ja – välineisiin kattavasti perusmittauksista aina vaativiin sähkönlaatua analysoiviin laitteisiin. Teho-, jännite- ja virta-arvot mitataan ja näytetään saarekekonvertterin valvomo-ohjelmassa. Tutkittaessa saarekekonvertterin toimintaa ja käyttöä, on syytä mitata kyseiset arvot laboratorion eri mittalaitteilla luotettavan käsityksen ja tuloksen saavuttamiseksi. Sähkön laatua voidaan arvioida tätä tarkoitusta varten suunnitellulla sähkönlaatuanalysointilaitteilla.

Tässä työssä käytetyistä mittalaitteista on kerätty esittelyn omaisesti tärkeimmät ominaisuudet tähän kappaleeseen. Käytetyt mittalaitteet auttavat huomaamaan eri ilmiöiden ja ominaisuuksien mittaus- ja tutkimusmahdollisuuksia oppimisympäristössä. Muita mittauksissa, testauksissa ja tutkimuksissa käytettyjä laitteita ei tässä työssä esitellä. Jokaisesta mittalaitteesta löytyvät sekä paperiset että sähköiset manuaalit ja datasivut, joista selviää tarkemmin laitteiden käyttö, tarkkuudet, virhearviot ja muut tekniset ja käyttöturvallisuuteen liittyvät tiedot.

5.3.1 Yleismittarit

Chauvin Arnoux F09

Virtapihtiyleismittari Chauvin Arnoux F09 (kuva 12) soveltuu kiertosuunnan ja käynnistysvirtojen mittaukseen. Mittalaite mittaa virran ja jännitteen todellista tehollisarvoa sekä tasa - että vaihtosähkön komponenteille. Edellä esitettyä ominaisuutta merkitään TRMS (AC/DC).



Kuva 12. Chauvin Arnoux F09 -tehopihtimittari.

Chauvin Arnoux F09 -tehopihtimittareita voidaan käyttää muun muassa moottoreiden käynnistysvirtojen mittaamiseen. Mittarilla voidaan mitata virtaa, jännitettä, resistanssia, tehoa ja taajuutta. Laitevalmistajan mukaan laite mittaa tehollisar-

von myös säröytyneelle sinisignaalille. Mittalaite on kädessä pidettävä helppo-käyttöinen ja kevyt pihtimittari, jolla voidaan mitata vaihevirtoja vaivattomasti ja turvallisesti keskuksista. Automaattinen aluevalinta, pito ja LCD-näytön taustavalo kuuluvat vakiovarusteina laitteeseen. Mittalaite on standardin EN 61010-1, mukainen, 600 V Cat III-luokan mittari.

Tehomittari Metrix PX120

Mittari on perustehomittari, josta samalla mittauksella saadaan LCD – näytölle virta, jännite ja teho (kuva 13). Käynnistysvirtapiikit (virran maksimiarvo puolen jakson ajalta) voidaan mitata INRUSH-toiminnalla. SMOOTH – toiminnalla mitaustulos on n kolmen sekunnin keskiarvo. Tehomittarin tulokset saadaan siirrettyä PC:lle ja mitaustulokset voidaan liittää dokumentteihin. Mittarin sähköturvalisuus on IEC 1010 CAT III mukainen.



Kuva 13. Metrixin tehomittari PX120.

Tehomittarin käyttö on helppoa ja selkeää. Kytettäessä laitetta virtapiiriin tulee tarkistaa mittalaitteen sopivuus mitattavaan piiriin. Virtamittauksen suhteen tulee noudattaa varovaisuutta, ohjeita ja määräyksiä. Saarekekonvertterin kuormitusliittimet ovat vikavirtasuojamattomia.

5.3.2 Sähkönlaatuanalyssaattorit

KEW 6310 sähkönlaatuanalyssaattori

Kyoritsun valmistamalla Kew 6310 tehoanalyssaattorilla (kuva 14) voidaan suorittaa muun muassa teho-, aaltomuoto-, yliaalto- ja häiriömittauksia, ajastettuja mittauksia mittaussvälillä 1 s – 1h. Mittaustulokset saadaan PC-ohjelmiston avulla dokumentoitavaan muotoon. Laitteistoon saa 5 A – 3 kA alueella erilaisia virtapihtejä.



Kuva 14. KEW 6310 sähkönlaatuanalyssaattori.

KEW 6310 sähkönlaatuanalyssaattori täyttää standardien IEC 61010-1, IEC 61010-031 ja IEC 61326 vaatimukset ja on luokan CAT III, 600V mukainen mittalaite. (KEW 6310 2015.)

Metrix OX 5022

Mittalaite on käsiskoppina käytettävä mittalaite, jossa yhdistyy oskilloskooppi, tehomittaus ja harmonisten yliaaltojen analysointi. Laite on 600 V Cat III –luokan mittalaite (kuva 15). Mittalaitteessa on kaksi kanavaa. Laitteen kaistanleveys on 20 MHz ja yliaallot mitataan 31. harmoniseen saakka (taajuusalue 40 – 450 Hz).



Kuva 15 Metrix OX 5022 handscope.

Laite soveltuu erityisen hyvin ensimmäisiin sähkönlaatumittauksiin helppokäyttöisyytensä vuoksi. Mittaustuloksia voidaan käsitellä PC-ohjelmistolla.

Sähkönlaatuanalysointilaitteet Fluke 43B

Fluken sähkönlaatuanalysointilaitteissa (kuva 16) on perusmittalaitteet kuten 20 MHz oskilloskooppi ja yleismittari. Laite mittaa harmoniset yliaallot jännitteestä, virrasta ja tehosta 51. yliaaltoon saakka. Laite mittaa harmonisen särön ja harmonisten vaihekulmat. Laitetta voidaan käyttää jatkuvaan mittaukseen jaksokohdaisesti virrasta ja jännitteestä 16 vuorokauden ajan.



Kuva 16. Fluke 43B sähkönlaatuanalysointilaitteet (Fluke 2015)

Mittaustulokset voi tallentaa laitteen muistiin. Mittaustulokset on saatavilla graafisesti laitteen LCD-näytöltä ja ne voidaan lukea PC-ohjelmiston avulla tietokoneelle käsittelyä ja dokumentointia varten. (Fluke 2015.)

6-kanavainen tarkkuustehoanalysaattori LMG500

Monipuolinen ja vaativaan käyttöön soveltuva laite on 6-kanavainen tehoanalysaattori LMG500 (Multiphase Precision Power Meter LMG500). Laite mittaa reaaliajassa 6 – kanavaisesti sähkön laatua (kuva 17). Erityisen hyvin tämä laite soveltuu tuulivoimageneraattorilta tulevan ja saarekekonvertterilta jakeluverkkoon menevän sähkönlaadun tarkasteluun. Laitteella voidaan mitata syöttövaiheiden sähkönlaatu reaaliajassa kahta puolta saarekekonvertteria samanaikaisesti. Laite on suunniteltu sähkökoneiden, taajuusmuuttajien, muuntajien, tehoelektroniikan, hakkuriteholähteiden ja valaisimien kehitys-, testaus- ja optimointityöhön. (LMG500, User Manual. 2013.)



Kuva 17. Tehoanalysaattori LMG500.

LMG500-6 ominaisuuksia ovat mm tarkkuus 0,025 % alueen ollessa DC – 10 MHz. Mittausalueet jännitteelle, virralle ja suurtaajuudelle ovat:

1. Suora jännitemittaus: 3/6/12,5/25/60/130/250/400/600/1000 V trms; 3200 Vpk
2. Sensorijännitemittaus: 30m/ 60m/ 120m/ 250m/ 500m/ 1/2/ 4V trms; 8 Vpk
3. Suora virtamittaus: 20m/ 40m/ 80m/ 150m/ 300m/ 600m/1,2/ 2,5/ 5/ 10/ 20/ 32Atrms; 120 Apk
4. Sensorivirtamittaus: 30m/ 60m/ 120m/ 250m/ 500m/ 1/2/ 4V trms; 8 Vpk
5. HF suoramittauksena: 150m/ 300m/ 600m/ 1,2A trms;2,6 Apk

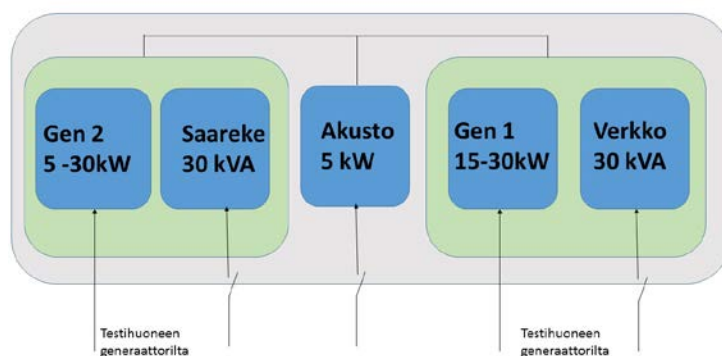
Laite mittaa harmoniset ja harmonisten väliset yliaallot 99 harmoniseen yliaaltoon asti. Laitteistoon kuuluu PC-ohjelmisto, jolla mittausdataa voidaan käsitellä ja dokumentoida. Laitteiston laajoihin ominaisuuksiin voi tutustua LMG500 laitemanuaalin avulla.

6 SAAREKEKONVERTTERI

Sähkövoimalaboratoriorahankkeessa saarekekäyttöjen tutkimiseen ja opiskeluun hankittua laitteistoa kutsutaan saarekekonvertteriksi. Saarekekonvertteri koostuu verkkoyksiköstä ja saarekekäytön yksiköstä. Yksiköt ovat lahtelaisen Nocartin valmistamia sähkönhallintayksiköitä, joista laitevalmistaja käyttää nimitystä PGU (Power Generator Unit). Laitteiston toimintaan ja rakenteeseen on tarvetta perehtyä piirikaavio- ja laitetuntemustasolla, jotta ongelmatilanteista selviytyy. Seuraavaksi laitteistoa on kuvattu toimintaperiaatteiden, rakenteen, kuvien ja piirikaavioiden avulla.

6.1 Rakenne

Saarekekonvertterin verkkoyksikkö sisältää verkko-osan ja generaattori 1 liitynnän. Saarekeyksikkö sisältää saarekekäytön ja generaattori 2 liitynnän. Akusto on sijoitettu fyysisesti verkko-osan keskuskaappiin. Tehosuuntaajayksiköinä toimivat ABB:n AC800 kahteen suuntaan tehoa siirtävät taajuusmuuttajat. Laitteistojen periaatteellinen sijoitus ja kytkentä on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Saarekekonvertterin osien sijoittelu.

Saarekeyksikkö, akusto ja verkkoyksikkö on kytketty sähköisesti yhteen ja ne muodostavat saarekekonvertterin yhteisen jänniteverkon. Tehon siirto verkkoon tai verkosta tapahtuu verkko-osan kautta. Liitteessä 2 sivulla 1 on esitetty verkko-osan piirikaavio. Verkko-osaan tulee liityntä valtakunnanverkosta ja generaattori

1 syöttö sekä saarekesyöttö näkyvät piirikaaviosta. Kuvassa 19 on saarekeosan keskuskaappi ja kuvassa 20 verkko-osan keskuskaappi ovet auki kuvattuina.



Kuva 19. Saarekeosan keskus.

Kuva 20. Verkko-osan keskus.

Keskukset ovat IP2X suojausluokan mukaiset. Keskusten syöttö tulee NK 102 ja ohjausjännite viereisestä keskuksesta JK 108.

6.2 Toimintaperiaate

Tehonhallintayksikkö muuttaa generaattorin akselin pyörimisliikkeen kautta otetun vaihtuvajännitteisen ja – taajuisen sähkötehon 400 V, 50 Hz kolmivaihesähköksi. Sähkönlaatu täyttää standardin EN50160 mukaiset sähkön laatuvaatimukset. Laitteistoa voidaan käyttää pyörivää liikettä generaattoreille tuottavien sähkölaitteiden kanssa. Tällaisia voimakoneita on tuuli-, vesi- ja varavoimaloissa. Aurinkopaneeleita voidaan myös liittää sähköjärjestelmään. (Nocart 2013.)

Laitteistoa voidaan käyttää jakeluverkosta erotettuna saarekkeena tai laitteiston kautta voidaan siirtää tehoa kahteen suuntaan. Generaattoreilla 1 ja 2 tuotettua tehoa verkkoon siirrettäessä voidaan laitteistolla mallintaa hajautetun tuulituotannon verkkovaikutuksia.

Akustoon ladataan sähköä joko verkosta tai generaattoreiden avulla. Saarekkeena toimiessaan laitteisto ottaa tarvittavan tehon generaattorilta. Akusto tasaa kuormitustehon muutoksia ja tarvittaessa syöttää lyhytaikaisesti kuormaan lisätehoa generaattoreiden lisäksi. Akustoa voidaan käyttää myös yksistään kuormituksen lyhytaikaisena varalähteenä.

Generaattoriliitännässä 1 voidaan käyttää 15 – 30 kW teholuokan generaattoria ja generaattoriliitännässä 2 voidaan käyttää 5 – 30 kW teholuokan generaattoria sähköntuotantoon. Generaattoriliityntöjä voidaan käyttää toisistaan riippumatta ja myös yhtäaikaisesti, kunhan yhteenlaskettu teho ei ylitä 30 kVA maksimitehoa.

6.3 Saarekekonvertterin käyttö

Saarekettä voidaan ajaa nimellistehollaan sähköverkon ollessa kytkettynä jakeluverkkoon ja pelkän akuston varassa maksimissaan 4 kVA teholla. Kuormitukseen voidaan hetkellisesti syöttää suurempaa tehoa kuin mitä generaattori kykenee syöttämään akustosta otetun lisätehon summautuessa generaattorin tuottamaan tehoon. Kuitenkaan laitoksen kokonaistehoa ei saa ylittää.

Keskuksen ohjaaminen tapahtuu paikallisesti tai etäyhteydellä web-käyttöliittymän kautta voimalan ohjelmalla. Keskuksen pääkytkin, akuston kytkin sekä saareke- ja generaattoriajojen käytönsallintakytkimet on käännettävät manuaalisesti keskuksesta. Lisäksi generaattorit on käytävä fyysisesti kytkemässä järjestelmään ja käynnistettävä testaushuoneen taajuusmuuttajilta T01 ja T02.

6.4 Akusto

Akusto koostuu 6 kpl CT100-12 sarjan akkuja. Akun jännite on 12 V ja nimellinen kapasiteetti 100 Ah 10 tunnin käytöllä. Akkutyypin on tarkoitettu toimimaan keskeytyvän sähkönsyötön varavoimavoiman (UPS), sähkötehon syöttöyksikkönä (EPS) ja hätäjärjestelmien tehonsyötön varmennuksena. Akkuissa venttiiliohjattu rakenne (VRLA, Valve-Regulated Lead Acid battery), joka estää happovuodot ja takaa korkean turvallisuustason. Lyijyakkujen käyttöiäksi luvataan 10 vuotta. Akkutyypin täyttää ISO9001, ISO14001, IEC 896 - osa 2, JIS C8702, BS 6290- osa 4 ja UL- hyväksyntä (MH25860) spesifikaatiot ja standardit. (Akkunetti 2015)

Kuvassa 20 on nähtävissä akuston sijoitus verkko-osan keskukseen. Yläosassa oikealla on generaattori 1 taajuusmuuttaja ACS800-11- 0030 - 3. Taajuusmuuttajan vasemmalla puolella ylimpänä on verkon valvontalaite. Taajuusmuuttajan alla ovat akustolle menevän syötön sulakkeet ja saarekekäytölle menevän syötön sulakkeet. Liitteessä 2 sivulla 1 saarekekäytölle menevän syötön sulakkeet on merkitty 2F7 (1U1:+ ja 1U1:-). Akustolle menevän syötön sulakkeet on merkitty 2F1 (2U1:DC+ ja 2U1:DC-)

6.5 Taajuusmuuttajat

Generaattori 1:n syöttää taajuusmuuttajaa ACS800-11-0030-3, jonka maksimiteho on 30 kW ja jatkuva maksimivirta 59A. Generaattori 2 syöttää taajuusmuuttajaa ACS800-11-0100-7, jonka maksimiteho on 90 kW ja jatkuva maksimivirta 93A.

ABB:n ACS800-11-sarjan taajuusmuuttajat ovat teollisuuskäyttöön suunniteltuja verkkoon jarruttavia, energiatehokkaita ja pieneen tilaan rakennettuja taajuusmuuttajia. Laitteissa voidaan käyttää täyttä tehonjakoa niin moottori- kuin generaattoritilassa. Taajuusmuuttajat on varustettu aktiivisella syöttöyksiköllä, LCL-suodattimella ja integroidulla latauspiirillä. (ABB 2015.)

Taajuusmuuttajan tärkeimmät ominaisuudet ovat:

- Tehoalue 5,5–110 kW
- Suora momentinsäätötekniikka (DTC) vakiona
- IP21-kotelointiluokka
- Analogiset ja digitaaliset I/O-laajennusmoduuli- ja anturivaihtoehdot
- EMC-suodattimet ja LCL-suodatin

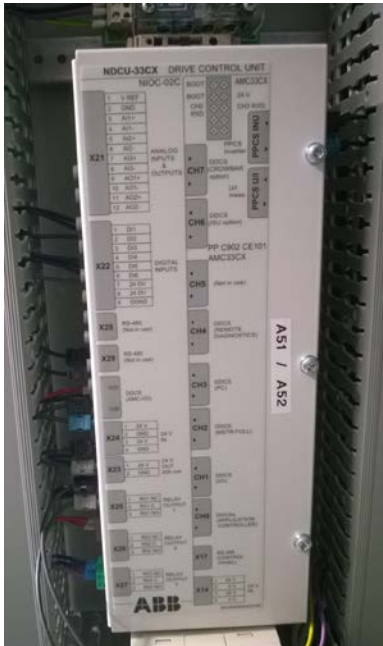
Laite tukee monenlaisia kenttäväyläprotokollia. (ABB 2015.)

Kuvassa 19 näkyy oikealla ylhäällä generaattori 2 taajuusmuuttaja ACS800 – 11 - 0100 – 07. Taajuusmuuttajan vieressä on MSc – saarekeinverteri, jota ohjataan ABB:n AX521 logiikalla. Saarekeinverteri MSc ohjaa generaattoreilta taajuusmuuttajien kautta tuodun tehon tarvittaessa akustoon. Liitteen 2 sivulta 2 esityksessä piirikaaviosta on nähtävissä taajuusmuuttaja 2 ja MSc – yksikön sähköiset kytkennät.

6.6 Laitteiston muut ohjaustoiminnot

Schneider Electricin XPS AC5121 turvarele ohjaa keskuksen hätäseis - toimintoja.

Generaattoreiden ohjaus ja säätö toimii Modbus Adapter NMBA – 01 on asynkronisen sarjaprotokollan kautta. Laite ohjaa käynnistys- ja pysäytyskäsky, moottorin nopeuden ja momentin ohjauksen, ohjauksen PID-säädön, lukee tilatiedot ja oloarvot ja muuttaa ohjausparametrien arvoja. Ohjauksen säätöyksikkönä toimii NDCU – 33CX (kuva 21a). Taajuuskonvertterina toimii ABB:n NAMU – 01C (kuva 21b).



Kuva 21a. NDCU – 33CX



Kuva 21b. Taajuuskonverteri NAMU – 01C

Saarekeosan keskuskaapissa sijaitsee myös logiikkayksikkö. Häiriötilanteissa ERR-ledi (virhe-ledi) palaa punaisena. Voimalaa ei voi ohjata ennen virheiden kuitausta. ABB:n AX521 logiikka on kuvassa 22 nähtävissä. Fyysinen sijainti on saarekeosan keskuskaapin vasemmalla sivuseinällä ylhäällä. Logiikkakuva on käännetty 90°, todellisuudessa myös logiikka on Modbus Adapterin ja taajuuskonverterin tapaan pystyasentoon asennettuna.



Kuva 22. AX521 logiikka.

Logiikan päällä on modemyksikkö, jossa on mm RS485-liityntä. Jos verkkoyhteys ei toimi, voi liityntäkaapeleiden kiinnityksen tarkistaa modemilta.

Verkkovalvontalaitteena toimii Carlo Gavazziin valmistama DPC 72 verkonvalvontarele (kuva 23). Digitaalisella liitynnällä olevan suojareleen toimintoja ovat yli- ja alijännitteen sekä yli- ja alitaajuuden, vaihekatkojen ja vaihejärjestyksen seuranta. Verkkovalvontalaitteen avulla saarekekäytöstä voidaan palata jakeluverkkoon automaattisesti.



Kuva 23. Verkkovalvontarele.

6.7 Tuulivoimasimulaattori

Testaushuoneessa on tuulivoimasimulaattorin muodostama moottoriyhdistelmä. Toinen moottoreista ottaa tehon kiinteistön sähkönjakeluverkosta tai 10 kV keskukseen lähdöstä. Moottori pyörittää samalle askelille asennettua generaattoria, jonka tuottama teho siirretään taajuusmuuttajan T01 tai T02 kautta saarekekonvertterille. Taajuusmuuttajat ovat ABB:n ACS800 – sarjaa. Kuvassa 24 on tuulivoimasimulaattoriksi asennettuna 11 kW moottori-generaattoriyhdistelmä. Taajuusmuuttajalle on tehty tuulivoimaa mallintava moottorin ajomalli.



Kuva 24. 11 kW tuulisimulaattori.

7 SAAREKEKÄYTTÖ

Laitteisto toimii saarekkeessa silloin, kun yhteyttä normaaliin jakeluverkkoon ei ole. Oppimisympäristön laitteistoa käytetään aluksi hajautetun verkkoon tehoa syöttävän tai verkosta tehoa ottavan pienen mikrotuotantolaitteiston tavoin. Kuormana käytetään moottorikäyttöjä, valaistusta, lämmitystä, muuntajia tai muuta vastaavaa kuormitusta. Verkkoyhteyden katkettua jää laitteisto saarekekäyttöön. Työssä tarkastellaan saarekekäytön aikaisia tehonvaihteluiden aiheuttamia sähkönlaatuilmiöitä saarekeverkossa. Työssä tutkitaan myös saarekekonvertterin toimintaa jakeluverkon häiriötilanteen poistuttua.



Kuva 25. Saarekekäyttö.

Saarekekäytön kuormanliityntäpisteet sijaitsevat saarekekäytön keskuksen ovenssa. Kuvassa 25 saarekekäytön kuormaksi on kytketty vastusvaunu.

7.1 Käyttötavat oppimisympäristössä

Saarekekonvertteria voidaan käyttää useammalla vaihtoehtoisella tavalla oppimisympäristössä. Saarekekäytössä laitteisto kytketään irti muusta verkosta ja saarekkeen kuormaan voidaan syöttää tehoa akustosta ja/tai generaattoreilla G1 ja G2.

Toinen tapa käyttää laitteistoa on siirtää tuulivoimasimulaattorin tuottama teho verkkoon. Tuulivoimasimulaattorin tuottamaa sähkötehoa ja sähkön laatua voidaan tarkastella häiriöanalysaattorilla määritellyissä mittauspisteissä.

7.2 Saarekekonvertterin käyttöohjeistus

Saarekekonvertterin erilaiset käyttötavat on ohjeistettu opinnäytetyön yhtenä osana. Erityistä huomiota on kiinnitettävä sähkötyöturvallisuuteen ja huolelliseen perehtymiseen työhön, ennen kuin aloittaa saarekekonvertterin käytön. Etäkäytönä laitteistoa käytettäessä on paikan päällä laboratoriossa oltava henkilö, joka käynnistää laitteistot ja tuulivoimageneraattorit.

Sähkökytkentöjen teossa tulee olla huolellinen ja tehdyt kytkennät on ohjaajan tarkastettava ennen laitteistojen kytkemistä jännitteiseksi. Saarekekonvertterin kuorma kytketään liittimiin, joka ei ole vikavirtasuojattu.

Liitteessä 3 on esitetty saarekekonvertterin käytön ohjeistus. Opinnäytetyöstä rajataan ulkopuolelle muut ohjeistukset.

7.3 Oppimisympäristön hajautettu tuotanto

Sähkövoimatekniikan laboratorion sähkövoimaverkkoa voidaan käyttää mallintamaan hajautettua tuotantoa. Yksivaiheista aurinkovoimalaa, kolmivaiheista tuulisimulaattoria ja dieselgeneraattoria voidaan käyttää pienessä mittakaavassa

mallintamaan hajautettua tuotantoa. Aurinkovoimala on kytketty yksivaiheisesti NK102 syöttämään alakeskukseen. Tuulivoimasimulaattori syöttää jakeluverkkoon sähköenergiaa NK102 kytketyn saarekekonvertterin kautta. Dieselgeneraattori syöttää sähköenergiaa 10 kV / 110 kV kojeistojen ja NK 102 kautta jakeluverkkoon.

Hajautetun tuotannon verkkovaikutuksia voidaan tutkia mittaamalla sähkönlaatua tuotantopisteistä seuraavassa portaassa keskuksissa ja muuntajien jälkeen. Vaikka tuotantotehot ovatkin pieniä, voidaan niiden avulla selvittää esimerkiksi aurinkoisena päivänä tuotetun aurinkosähkön verkkovaikutus nousukeskuksella NK 102. Sähköautonlatausaseman käyttö mahdollistaa sähköauton latauksen verkkovaikutusten selvittelyn, lisäksi älykkään moottorikeskuksen kautta voidaan verkkoon kytkeä kulutuksen sallimissa rajoissa pyöriviä koneita ja moottoreita. Älykkäässä moottorikeskuksessa voidaan verkkoon tuotettu induktiivinen loisteho kompensoida kondensaattoripariston avulla. Verkkovaikutuksia sähkönlaatuun voidaan havainnoida ja tutkia useilla eri variaatioilla.

Sähkölaboratorioiden verkko voidaan kytkeä paikallisesta jakeluverkosta kiinteistön pääkeskukselta, jolloin sähköä tuotetaan omaan tarpeeseen laboratorioiden alueella. Käytännössä tämän tyyppinen saarekekäyttö tulee kysymykseen vain poikkeusjärjestelyin, sillä saarekekäyttö voi aiheuttaa tarpeetonta haittaa muille laboratorioiden käyttäjille.

7.4 Tehotasapaino saarekekäytössä

Laboratorion saarekeverkko muodostuu akustosta ja generaattoreista, joilla tehoa voidaan syöttää saarekkeeseen. Jos käytöstä on yhteys paikalliseen jakeluverkkoon, on saarekekäytön verkko jäykkä. Tehon muutokset eivät näy tehotasapainossa. Kun laitteisto toimii saarekekäytössä, on saarekeverkko edelleen jäykkä, tuulisimulaattorin nykyisellä ajomallilla. Pienet tehoheilahtelut tasoittuvat saarekeverkossa akuston tasapainottaessa. Tuulisimulaattorin mallia on mahdollista modifioida todellisia tuulen puuskaa vastaavaksi, jolloin tuotetussa tehossa

näkyvät tuotantoheilahtelut välittyvät tehokkaammin saarekkeeseen. Nämä tehoheilahtelut saattaisivat näkyä ongelmina saarekkeen sähkönlaadussa tai jopa saada saarekkeen epästabiliin tilaan.

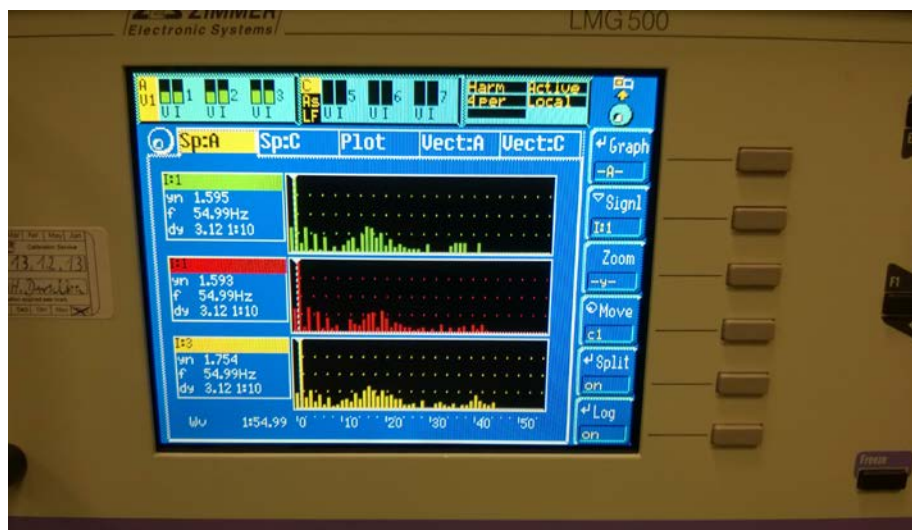
Saarekeverkkoa tulee kuormittaa lähellä laitteiston nimelliskuormaa vastaavilla kuormilla. Tällöin tehotasapainossa näkyisi selvemmin muuttuvan kuormituksen asettamat haasteet.

7.5 Testauksen ja tutkimuksen suoritus

Opinnäytetyössä käytettiin saarekekonvertteria saarekkeessa ja verkkokäytössä. Laitteisto käynnistettiin verkkoyhteyteen ja kuormituksena käytettiin suuritehoisia vastus-, kela- ja kondensaattorikuormia. Lisäksi laitteistoa kuormitettiin 5 kW moottorilla. Moottorin akselilla ei ollut taakkaa, joten moottorin kuormittava vaikutus jäi pieneksi. Moottorikäytöstä luovuttiin ja saareketta kuormitettiin induktiivisella, kapasitiivisella ja resistiivisellä kuormalla ja samalla aiheutettiin kuormituksen äkillisiä muutoksia.

Laitteistoa ohjattiin verkkoyhteyden avulla paikallisesti ja etäyhteydellä Tosiboxin avulla. Molemmilla ohjaustavoilla saatiin laitteistoa ajettua hallitusti. Etäyhteyden avulla laitteistoa käytettäessä, on muistettava, että laboratoriossa on oltava sähköalan henkilö kääntämässä pääkytkimiä, käynnistämässä laitteita ja kuittaamassa tarvittaessa häiriöitä.

Testauksen mittaustuloksia verrattiin voimala-ohjelmiston antamiin lukemiin. Mittauksissa käytettiin useita eri mittareita ja analysointilaitteita. Kuvassa 26 on saarekekäytön sähkön harmoniset yliaallot mitattuna. Mittauksien aikana havaittiin sekä parillisten että parittomien harmonisten yliaaltojen esiintyminen eri kuormituksilla.



Kuva 26. Saarekekäytön sähkönlaatu analysaattorilla mitattuna.

Laitteiston kytkeytymisessä takaisin jakeluverkkoon ei ollut ongelmaa. Verkonvalvontarele toimii ongelmitta. Molempia generaattoreita käytettäessä saarekkeen sähköntuotantolaitteistoina yhtä aikaa, on huolehdittava, ettei ylitetä saarekekonvertterin tehonkestoa.

8 TULOSTEN KÄSITTELY

Työn tuloksena saatiin saarekekonvertterista käyttökokemusta ja laitteistolle luotiin käytön ohjeistus opetukseen ja tutkimustyön pohjaksi. Saarekekäytön ja tuulisimulaattorin yhteiskäyttö ja käytön ohjeistus tehtiin opinnäytetyön tuloksena.

Mittalaitteistoista saatiin hyvää kokemusta ja suoritettujen laitevertailujen perusteella tuntemusta mittavälineiden tasokkuudesta tehdyissä mittauksissa. Mittaustulokset noudattavat teoriaa. Työssä tehdyillä mitta- ja testauslaitteistoilla ei saatu huomattavia verkkovaikutuksia aikaiseksi nykyisillä tuulisimulaattorin ajomalleilla. Tämä johtuu saarekeverkon jäykkyydestä.

Mittaustuloksista havaittiin, että saarekekäytön aikainen sähkönlaatu vaatii lisäselvityksiä. Työssä saatujen tulosten perusteella saarekeverkossa esiintyy yliaaltoja. Vaikuttaisi, että nykyiset suodattimet eivät poista niitä riittävän tehokkaasti. Mittaustulosten perusteella ei voi päätellä vertailuarvojen puuttuessa, onko vika suodattimissa vai onko kyseessä laitteen ominaisuus. Yliaaltospektrissä harmonisten suuruus ja määrä 15. ja 16. yliaallon molemmin puolin vaatii lisäselvityksiä. Hakkuriteholähteet ja tehoelektroniikkalaitteet aiheuttavat yleensä parittomia yliaaltoja verkkoon.

Työstä rajattiin pois verkkovaikutusten mitta- ja saarekkeesta siirryttäessä yhteiskäyttöön. Yhteiskäyttötilanteeseen siirtymisen verkkovaikutukset vaativat mittauspisteiden rakentamisen siten, että mittaukset voidaan suorittaa turvallisesti.

Saarekekonvertterin käyttö paikallisesti ja etäyhteyden avulla mahdollistaa laboratorioden etäkäytön ja siten, opinnäytetyön tuloksena saadaan ensimmäinen aito etäyhteydellä tehtävä sähkövoimatekniikan laboratoriotyö opetuskäyttöön.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyössä selvitettiin Suomen sähköverkon rakennetta, suurhäiriöitä ja tulevaisuuden haasteita verkon sähkön toimitusvarmuudelle ja sähkön laadulle. Tulevaisuudessa kasvihuonepäästöjen rajoitusten myötä kiinnostus uusiutuvien luonnonvarojen tarjoamiin mahdollisuuksiin sähköntuotantomuotona lisääntyy. Sähkön kulutus muuttuu energiatehokkaammaksi ja sähkökäyttöiset ajoneuvot yleistyvät. Sähkön kulutus toisaalta laskee energiatehokkuuden myötä, toisaalta kasvaa sähköisten kulutuslaitteiden lisääntyessä. Työssä selvitettiin laajasti eri tutkimuslaitosten lähteistä tulevaisuuden energiankulutuksen kehitystä ja energian tuotannon, siirron ja jakelun haasteita. Yhtenä ratkaisuna sähkön siirtovarmuutta edistävänä tekijänä pidetään hajautettua mikrotuotantoa.

Kehittyvät tuotantomuodot ja teknologiat asettavat haasteita aihepiirin omaksuntaan ja opetukseen. Sähkötekniikan laboratorioihin on investoitu huomattava määrä uutta teknologiaa käyttäviä sähköntuotannon, siirron ja jakelun sekä sähkökäyttöjen laitteistoja. Sähkövoimatekniikan laitteistojen kokonaisvaltainen käyttö opetuksessa ja tutkimuksellisessa yhteistyössä yrityksien kanssa mahdollistuu opinnäytetyössä luodussa perustassa. Yhteiskäyttöjen ja saarekekäyttöjen tieto-taito, tuntemus ja hallinta auttavat hyödyntämään laitteistoja täysipainoisesti oppilaitoksen opetus- ja palvelutoiminnassa.

Työn tuloksina luotiin ohjeistus saarekekonvertterin yhteis- ja saarekekäyttöille oppimisympäristöissä. Tuulisimulaattorin käyttö tulee yleistymään opetuskäytössä saarekekonvertterin käytön avulla. Opinnäytetyössä havaittiin, että saarekeverkon tehotasapainoa ei voida nykyisellä tuulisimulaattorin ajomallinnuksella horjuttaa saarekeverkon ollessa liian jäykkä. Tuulisimulaattorin ajomalleja tulee kin kehittää jatkossa käytännön tuulikuormia vastaaviksi, jolloin saadaan aidot taajuusheilahtelut näkyviin saarekkeen kulutukseen. Työssä otettiin käyttöön saarekekonvertteri ja ohjeistettiin laitteen paikallis- ja etäkäyttö. Etäkäyttö mahdollistaa etälaboratoriotöiden teon tai simulaatioajot etänä. Etäkäyttö todellisen voimalan ajoon vaatii laboratoriohenkilökunnan paikan päällä olon käynnistys- ja pysäytystoimintojen suorittamiseksi.

Jatkokehitystyönä on hyvä suunnitella ja toteuttaa testaushuoneeseen keskus, johon voidaan kytkeä valaistusta, lämmitystä ja automaatiikalla ohjattavia kuormitettavia moottorikäyttöjä. Saarekekäytöissä tulee kuorman mallintaa normaali-käyttöä, jotta saadaan luotettavampia testaustuloksia saarekkeen käyttäytymisestä ja verkkovaikutuksista.

Saatujen mittaustulosten perusteella voidaan suorittaa jatkotutkimuksia saarekekäytöstä, erityisesti yliaaltojen esiintymisestä saarekeverkossa. Yhteiskäyttöön kytkeytymisen verkkovaikutusten selvittäminen ja mittaaminen vaatii mittauspis-teiden rakentamista sähkötyöturvallisuusvaatimukset huomioiden laitteistoihin. Mittauslaitteiden laajempi hyödyntäminen mahdollistuu opinnäytetyössä saadun tieto-aidon ja kokemuksen myötä. Työn yhtenä tuloksena havaittiin mittavälineiden käytännöllisten käyttöohjeiden tarve opetukseen.

Aiheen laajuuden ja mielenkiintoisuuden vuoksi aihepiirin rajaaminen oli ehkä haasteellisin tehtävä. Toisaalta laitteistojen käytön oppimisen myötä, on hyvä nähdä uudet kehityskohteet ja käyttömahdollisuuksien laajentaminen tulevaisuuden kehitysnäkymissä niin oppilaitoksen perusopetustoiminnassa kuin yritysysteistyökumppaneiden tutkimus- ja koulutuspalveluissa. Työ oli erittäin antoisa ja opettavainen. Työn edetessä onnistumisen ja oppimisen riemuakaan ei pidä väheksyä.

LÄHTEET

ABB 2009. Tuoteluettelo ABB industrial drives. Viitattu 25.11.2015.
https://library.e.abb.com/public/5650b5982159014bc125760300212d38/FI_ACS800singledrivescatalogREVK.pdf

Akkunetti 2015. Viitattu 2.12.2015.
<http://akkunetti.fi/akku-12ah-12v-ct1212-ctleader-lyijyakku->

Alanen R., Koljonen T., Hukari S. & Saari P. 2003. Energian varastoinnin nykytila. VTT TIEDOTTEITA – RESEARCH NOTES 2199. Viitattu 25.11.2015
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>

Appleseed Energy 2011. Viitattu 29.10.2015.
<http://www.appleseedenergy.com/grid.htm>

Elovaara, J. & Laiho Y. 2007. Sähkölaitostekniikan perusteet. Otatieto. Helsinki.

Energiateollisuus ry 2011. Mikrotuotantolaitoksen liittäminen sähkönjakeluverkkoon. Verkostosuositus YA9:09. Viitattu 5.11.2015
<http://energia.fi/julkaisut/mikrotuotannon-liittaminen-sahkonjakeluverkkoon-ya909>

Energiateollisuus ry 2014. Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje 17.11.2014. Viitattu 28.11.2015.
http://energia.fi/sites/default/files/sahkon_laatu_ja_toimitustapavirheen_sovellusohje_2014.pdf

Energiateollisuus ry 2015. Viitattu 25.10.2015. <http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut>

Energiavirasto 2015. Viitattu 20.11.2015. www.energiavirasto.fi

Eternalenergy 2015. Viitattu 28.11.2015. http://www.eternalenergy.co.za/Solar_Generators.php

Fingrid 2015. Viitattu 25.10.2015. www.fingrid.fi.

Finnwind Oy 2013. Aurinko-opas. Viitattu 15.10.2015.
<http://www.finnwind.fi/aurinko/Aurinkoenergiaopas-Finnwind.pdf>

Finsolar 2015. Finsolar -hanke. Aalto-yliopisto. Viitattu 25.11.2015
http://www.finsolar.net/?page_id=1150&lang=fi

Fluke 2015. Yrityksen nettisivu. Viitattu 30.11.2015.
<http://www.fluke.com/fluke/fifi/testerit/power-meters/fluke-43b-series.htm?pid=56081>

Helen 2015. Viitattu 28.10.2015
www.helen.fi/uutiset/2015/helsinkiin-pohjoismaiden-suurin-sahkovarasto/

Hirvonen R. 2013. Suomen energiavisio 2030. VTT. Viitattu 26.10.2015
http://www.vtt.fi/files/projects/energy_book_series/ev_2030_tiivistelma.pdf

Huoltovarmuuskeskus 2014. Vuosikertomus 2014. Viitattu 25.10.2015.
<http://www.huoltovarmuus.fi/static/pdf/817.pdf>

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 2003. IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. IEEE Std 1366-2003

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 1998. IEEE Trial-Use Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. IEEE Std 1366-1998.

Jääskeläinen S. 2014. Liikenne ja viestintäministeriön hallinnonalan ilmastopoliittinen ohjelma 2009 – 2020. Viitattu 5.12.2015
https://www.lvm.fi/docs/fi/3082174_DLFE-25809.pdf

KEW 6310 2015. Laitekäsikirja. Viitattu 29.11.2015.

http://www.kew-ltd.co.jp/en/download/pdf/manual/english/6310_E.pdf

Laitinen J. 2015. Sähköriippuvuus modernissa yhteiskunnassa. Turvallisuuskomitea 2015. Viitattu 25.10.2015

http://www.defmin.fi/files/3070/sahkoriippuvuus_modernissa_yhteiskunnassa_verkkojulkaisu.pdf

LMG500 Multi Channel Power Meter, User manual 2013. ZES Zimmer Electronic Systems GmbH

Motiva 2013. Nettisivu. Viitattu 11.11.2015. <http://www.motiva.fi/tuulivoima>

Motiva 2014a. Nettisivu. Viitattu 25.10.2015.

http://motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko

Motiva 2014b. Nettisivu. Viitattu 19.11.2015.

http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/vesivoima/pienvesivoima

Motiva 2014c. Nettisivu. Viitattu 19.11.2015.

http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_tuotantotekniikka/pien-chp

Motiva 2014d. Nettisivu. Viitattu 19.11.2015.

http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_tuotantotekniikka/pien-chp

Mysolarshop 2015. Viitattu 15.11.2015.

<https://www.mysolarshop.co.uk/solar-panel-diagram-i-94.html>

Mörsky, J. & Mörsky, J. 1994. Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka. Helsinki: Hakapaino Oy.

Nashcam 2015. Viitattu 15.11.2015.

<http://nashcam.com.au/on-grid-systems>

Nocart 2013. Laitemanuaali.

Nylund, M. 2015. Mediatiedote ”Emme selviä ilman säätövoimaa ja varareserviä” 12.2.2015. Viitattu 2.10.2015.

http://www.pohjolanvoima.fi/yritys/media/blogi/kirjoitukset/32/emme_selvia_ilman_saatoivoimaa_ja_tehoreservia

Opetushallitus, STEK & STUL. 2013 Sähkö-, työ- ja sähköturvallisuuden toimintaohje 2013.

Pahkin, A. 2015. Valve 2014 – harjoitus jatkotoimenpiteet. Huoltovarmuusorganisaatio. Viitattu 25.10.2015.

<http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Kayttotoimikunta/2015/VALVE%202014%20harjoitus%20tilanne.pdf>

Partanen, J., Pyrhönen, J., Silventoinen, P., Niemelä, M., Lassila, J., Kaipia, T., Salonen, P., Peltoniemi, P., Nuutinen, P., Lana, A., Haakana, J., Pinomaa, A., Makkonen, H., Voutilainen, V., Paajanen, P., Järventausta, P., Tuusa, H., Suntio, T., Kannus, K., Lahti, K., Nikander, A., Mäkinen, A., Alahuhtala, J., Sunttila, T., Nousiainen, L., Rekola & J., Vornanen, T. 2010. Tehoelektroniikka sähkönjakelussa – Pienjännitteinen tasasähkönjakelu. LUT. Viitattu 25.10.2015.

<http://www.lut.fi/documents/10633/138922/Tehoelektroniikka+sahkonjakelussa+Loppuraportti+2010/639848d0-86c0-47ff-a9fc-057f745ff360>

Päivinen, R. 2014. Rovaniemen suurhäiriöharjoitus testasi sähköyhtiöiden ja viranomaisten yhteistyötä sähkönpalautuksessa – tiedote. Viitattu 16.10.2015.

<http://www.huoltovarmuus.fi/ajankohtaista/uutisarkisto/Rovaniemen-suurhairioharjoitus-testasi-sahkoyhtioiden-ja-viranomaisten-yhteistyota-sahkonpalautuksessa-30390.a>

Saukkolan Voima. 2015. Viitattu 29.11.2015.

<http://www.elisanet.fi/saukkolan.voima.oy/>

SFS-EN 50160. 2000. Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry

Sener 2001. Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon 2001. Viitattu 29.11.2015.

<http://energia.fi/sites/default/files/10930.pdf>

Sener 2002. 3111 YA 7:02 Sähköverkkoyhtiön toiminta suurhäiriössä. Adato Energia.

Suomen tuuliatlas 2010. Viitattu 11.11.2015.

<http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>

Sähkömarkkinalaki 588/2013 19§, 28§.

Tuulivoimayhdistys 2014. Viitattu 11.11.2015.

<http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta>

Valli, M. 2015. Sähkökatko haastaa johtamisjärjestelmät. Sähköala 10/2015.

Verho, P., Sarsama, J., Stranden, J., Krohns-Välimäki, H., Hälvä V & Hagqvist, O. 2011. Sähköhuollon suurhäiriöiden riskianalyysi- ja hallintamenetelmien kehittäminen. TTY, VTT.

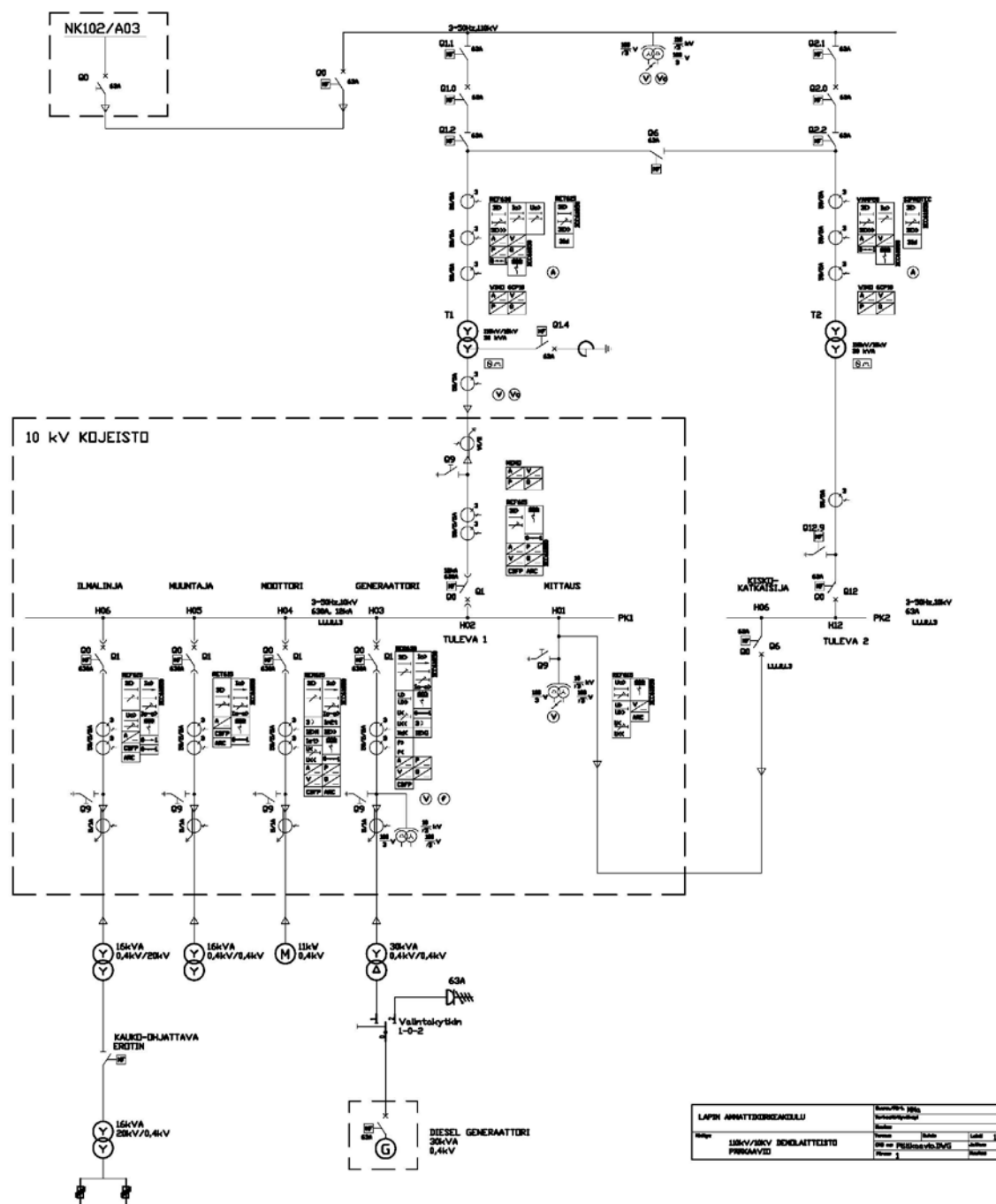
Verho, P., Stranden, J., Nurmi, V-P., Mäkinen, A., Järventausta, P., Hagqvist, O., Partanen, J., Lassila, J., Kaipia, T. & Honkapuro, S. 2010. Nykyisen valvontamallin arviointi – suurhäiriöriski. TTY, LTY

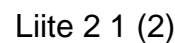
LIITTEET

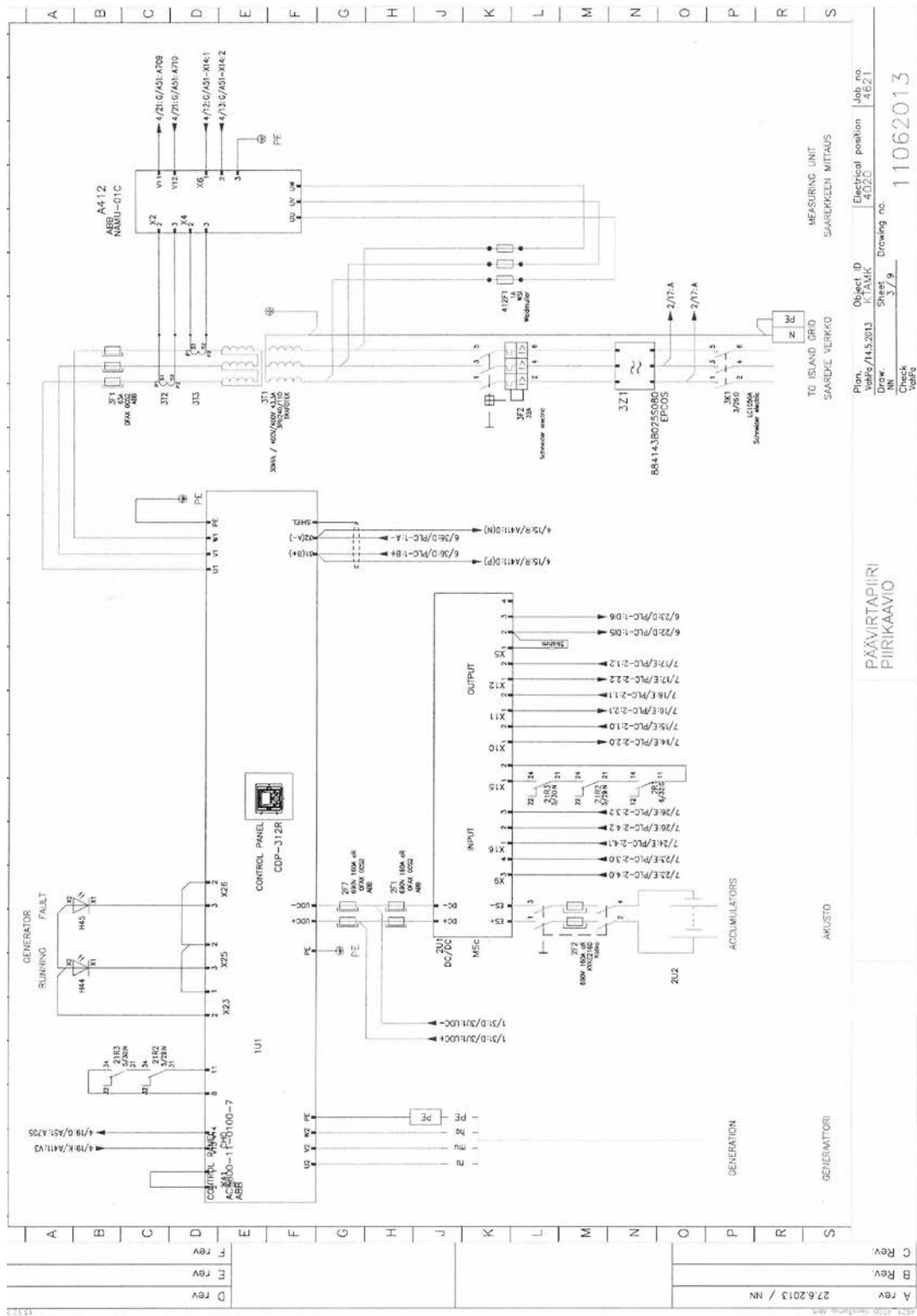
- | | |
|---------|--|
| Liite 1 | 110 kV / 10 kV Demolaitteiston pääkaavio |
| Liite 2 | Saarekekonvertterin piirikaavio (2) |
| Liite 3 | Saarekekonvertterin käytön ohjeistus |

110 kV / 10 kV Demolaitteiston pääkaavio

Liite 1







Sähkövoimalaboratorion saarekekonvertterilla voidaan luoda saareke, jolloin tehoa tuotetaan kuormaan joko generaattoreilla tai tarvittava teho otetaan akustosta. Saarekekonvertteria voidaan käyttää myös tuulivoimasimulaattorin tuottaman sähköän siirtoon valtakunnan verkkoon. Tällöin voidaan tarkastella tuulivoimalla tuotetun sähköän verkkovaikutuksia jakeluverkkoon.

Saarekekonvertterin käyttö sähköntuotannon saarekkeena

Tehtävän tavoitteena on käyttää laitteistoa saarekekäytössä sähkötyöturvallisuusseikat huomioiden. Sähkövoimatekniikan laboratorion sähkönjakelu selvittää sähköpiirikaavioiden ja kytkentäkaavioiden avulla.

Nocartin saarekekonvertterin syöttö on kiinteistösähköistyksen laboratorion 1143 tilasta nousukeskukselta NK102 lähdöstä 03D. Ohjausjännite tulee sähkövoimatekniikan laboratorion 1141 tilasta jakokeskukselta JK108.

Tarkista, että saarekekonvertterin kaapin ovet ovat asiallisesti suljettuina.

Tarkista että, syötön NK 102 03D pääkytkin on ON-asennossa.

Tarkista, että ohjausjännite JK 108 on ok (johdonsuojakatkaisijat ovat ON-asennossa).

Voimalaa on mahdollista ohjata joko langattomalla etäyhteydellä tai suoralla USB- liitynnällä sähkövoimatekniikan laboratorion työpöydästä 6.

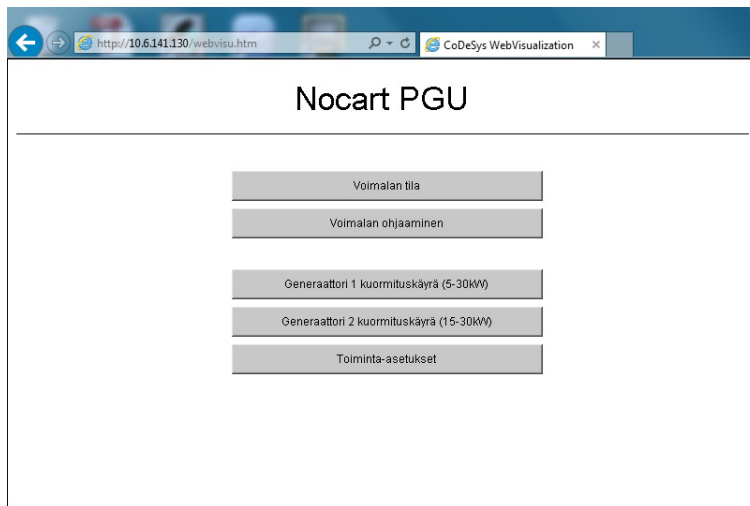
Tässä ohjeessa käytetään voimalaa käytetään työpöydästä 6.

Kytke NOCART- tunnuksin varustettu verkkokaapeli sähkölaboratorion verkon USB-liityntään työpöydässä 6.

Avaa sähkövoimalaboratoriotilan kannettava tietokone, jonka tunnus on L211-E6430-26. Koneen kirjautumistunnukset löytyvät koneeseen kiinnitetystä teipistä.

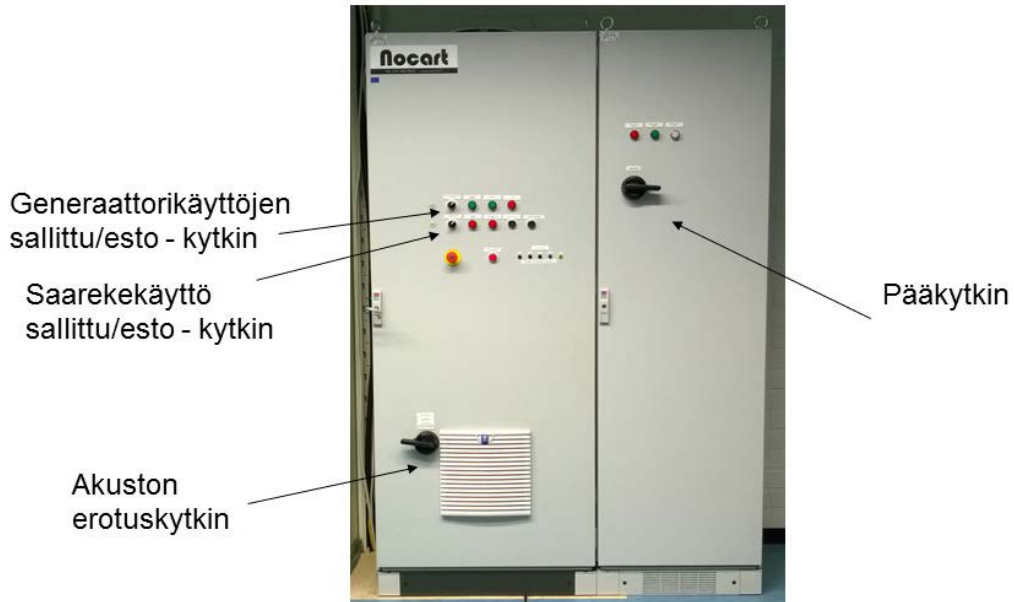
Syötä selaimen osoitteeksi [REDACTED].htm. Käynnistyksen alussa ohjelmisto kysyy Javan päivitystä. Älä päivitä Javaa, vaan kuittaa RUN – komen-
nolla latauksen jatkuminen. (Javaa ei saa missään tapauksessa päivittää,
sillä päivitetty versio estää etäyhteyden käytön).

Kun ohjelmisto käynnistyy, avautuu alla olevan kuvan mukainen näkymä.



Kohdasta Voimalan tila, voit tarkkailla voimalan eri osien tilaa ja kuitata mahdollisesti esiintyviä häiriöitä.

Voimalan ohjaaminen mahdollistaa voimalan yksiköiden etäohjauksen. On syytä muistaa, että paikan päällä on käytävä kääntämässä kytkimiä ja käynnistimiä. Tutustu keskuksen kytkimiin ja merkkilamppuihin (kuva 1) kuvan avulla ja käy tunnistamassa komponentit keskuksen ovesta.



Kuva 1. Saarekekonvertterikeskus

Aloita voimalan ohjaaminen tarkistamalla pääkytkimen asento. Väännä pääkytkin ON-asentoon saarekekonvertterikeskuksesta.

Väännä myös akuston erotuskytkin ON-asentoon keskuksen vasemman puoleisesta ovesta. Käyttäessäsi saarekettä tai generaattoreita, väännä niiden käytön sallinta/estokytkimet sallittu-asentoon.

Kytke tehtävässä määritellyt kuormitukset saarekekonvertterin liittimiin Saarekeverkko. Kuormitukset voivat olla vastuksia, kondensaattoreita, keloja, moottoreita, muuntajia tai näiden muodostamia kytkentöjä. Voimalan maksimitehoa ei saa ylittää, muista laskea suunnittelemasi kuormitustehoa karkealla tasolla ennen saarekekäyttöä. Kytke tehtävässä tarvittavat virta-, jännite- ja tehomittarit ja tee muut tarvittavat kytkennät. Kuormitusvirtaa on hyvä tarkastella koko laitteiston käytön ajan.

Sähköturvallisuus: Saarekekäytön ollessa sallittu, tulee keskuksen kaapinoven liittimiin jännite. Huomaa, että liittimien takana ei ole vikavirtasuojaa!

Jos muutat kytkentöjä kesken käytön, sammuta saarekekäyttö muutostöiden ajaksi.

Huomaa, että Voimalan tila ja Voimalan ohjaus – valikoissa näkyvät teho-, virta tai jännitearvot eivät ole tarkkoja arvoja.

Käyttäessäsi Voimala-ohjelmaa, valmistaudu odottamaan vaadittu aika jokaisen ohjaustoiminnan jälkeen. Liian nopeat toiminnot voivat saada aikaan virhetoimintoja tai sulakkeen palamisen.

Seuraavat ohjaustoimenpiteet tehdään tietokoneen Voimalan ohjaaminen – valikosta.

1. Kytke Voimalan ohjaus-valikosta keskus verkkoon. Odota kunnes generaattori valmis – vihreä merkkivalo syttyy.
2. Käynnistä Verkko painikkeella Käyntiin/seis.
 - laitteistosta alkaa kuulua pihinää
3. Käynnistä akusto Käyntiin/seis-painikkeella
 - akustosta alkaa kuulua pihinää
4. Käynnistä saareke Käyntiin/seis-painikkeella
 - saareke käynnistyy, ääni on melko voimakas puhina
 - vihreä merkkilamppu syttyy saarekkeen käynnissä olon merkiksi
5. Käynnistä generaattori 1 Käyntiin/seis-painikkeella.
 - generaattori 1 käy – valkoinen merkkilamppu syttyy keskuksen ovenssa

Generaattori on käytävä käynnistämässä myös fyysisesti taajuusmuuttajalta

Tee seuraavat toimenpiteet tuulivoimasimulaattorin generaattorin käynnistämiseksi.

Tarkista seuraavat kytkennät ja taajuusmuuttajan asetukset:

- Moottori-generaattorisimulaattori tulee olla kytketty taajuusmuuttajaan T01 ja turvakytkimeen Q10G1
- Tarkista T01 taajuusmuuttajan turvakytkin Q10.10.T01, oltava ON-asennossa. Tarkista, että 110 kW moottori-generaattoriyhdistelmä on kytketty taajuusmuuttajan turvakytkimeltä MP1 pistorasiaan ja sieltä menee syöttö moottorille. Moottori pyörittää generaattorin akselia ja generaattorin kehittämä teho syötetään generaattorilta lähtevällä kaapelilla MP2 pistorasian kautta pistorasialle SGP1. Pistorasialta syöttö menee turvakytkimelle Q10G1
- Käynnistä taajuusmuuttaja, tarkista paneelilta, että asetukset vastaavat käyttämäsi moottoria
- Moottori/generaattorisimulaattori käynnistyy ja pysähtyy taajuusmuuttajan kytkimiltä

Nyt voit tarkastella voimalan tilaa voimala-ohjelmistosta. Tarkista generaattorin pyörimisnopeus ja syötetty teho, tarkista akuston tila ja latautuuko akusto.

Seuraavaksi voit erottaa saarekekonverterin verkosta ja tutkia jääkö laitteisto toimimaan saarekkeena.

6. Irrota keskus verkosta Kytke/irrota painikkeen avulla. Voit kääntää myös pääkytkimen 0-asentoon.
7. Säädä kuormituksen virtaa ja tarkkaile voimalan tilaa.
 - Selvitä mikä vaikutus kuormituksen tilan muutoksella on generaattorin ja/tai akuston tilan muutokseen
8. Kytke verkkoanalysaattori määriteltymiin mittauspisteisiin. Selvitä generaattorilta lähtevä sähkön laatu.

9. Kytke saareke jakeluverkkoon. Jakeluverkkoon menevän sähkönlaatua voidaan mitata ja analysoida nousukeskukselta NK 102 tai saarekekonvertterilta. Kytkenät tulee tehdä ohjaajan toimesta sähkötyöturvallisuuslakia noudattaen.

Aja säädä saarekkeen kuormitusta siten, että kulutat kaiken generaattorilla 1 tuotetun tehon saarekkeen kuormituksessa. Säädä kuormitusta siten ylimenevä tuotanto ajetaan jakeluverkkoon. Havainnoi ohjelmistosta tehoarvot ja vertaa niitä mitattuihin tehoarvoihin.

Kun lopetat laitteiston käytön pysäytä generaattorikäyttö ohjelmistosta, käy pysäyttämässä generaattori myös taajuusmuuttajan 0-painikkeella, pysäytä saarekekäyttö ja akusto ohjelmistosta. Pysäytä voimala ja irrota voimala verkosta ohjelmiston painikkeilla.

Lopuksi, muista erottaa akusto kääntämällä akuston erotuskytkin OFF-asentoon. Käännä generaattoreiden ja saarekekäytön kytkimet käytönestoasentoon. Viimeisenä toimenpiteenä avaa saarekekonvertterikeskuksen pääkytkin.